

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА имени А. Н. БЕКЕТОВА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УЧЕБНИК

Перевод с украинского 2-го издания, исправленного и дополненного

Под редакцией В. Н. Охрименко

Харьков
ХНУГХ им. А. Н. Бекетова
2015

УДК [621.3:69](075.8)
ББК 31.2я73-1+38я73-1
Э45

Авторы:

Анатолий Егорович Ачкасов, доктор экономических наук, профессор;
Владимир Андреевич Лушкин, доктор экономических наук, профессор,
заслуженный энергетик Украины и СНГ, академик Международной
инженерной академии, Академии Инженерных наук Украины;
Вячеслав Николаевич Охрименко, кандидат технических наук, доцент;
Татьяна Борисовна Воронкова, старший преподаватель

Рецензенты:

Ю. Г. Куцан, доктор технических наук, академик АТН Украины;
А. В. Праховник, доктор технических наук, профессор, директор института энерго-
сбережения и энергоменеджмента НТУ Украины "КПИ";
О. И. Яковлев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергоуста-
новок космических летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета
им. М. Е. Жуковского (ХАИ), заслуженный изобретатель Украины, академик АНВО Украины.

*Рекомендовано к печати Ученым советом Харьковского национального университета
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, протокол № 9 от 3 апреля 2015 г.*

Текст печатается по изданию:

Електротехніка у будівництві : підручник / [А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін,
В. М. Охрименко, Т. Б. Воронкова] ; за ред. В. М. Охрименка ; Харків. нац. ун-т міськ.
госп-ва ім. О. М. Бекетова. – 2-ге вид., випр. і доп. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,
2015. – 444 с.

Э45 **Электротехника в строительстве** : учебник / [А. Е. Ачкасов,
В. А. Лушкин, В. Н. Охрименко, Т. Б. Воронкова] ; под ред. В. Н. Охрименко ;
пер. с укр.; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – 2-е изд.,
испр. и доп. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015. – 476 с.

ISBN 978-966-695-367-7

Материал 1-го издания учебника "Електротехніка у будівництві" (утверждено
МОН Украины как учебник для студентов строительных специальностей высших учеб-
ных заведений, письмо № 1/11-5516 от 22.06.2010 г.), дополнен вопросами тем "Син-
хронные электрические машины", "Электрические измерения" и "Машины постоянного
тока". Приведены основные сведения из теории электрических цепей, трансформаторов,
электрических машин, основ электроники и электропривода. Описано электрооборудо-
вание строительных площадок, предприятий строительной индустрии, инженерных сис-
тем зданий. Темы содержит контрольные вопросы для закрепления материала. Приведены
задачи практического содержания с примерами их решения.

Учебник рассчитан на студентов ВУЗов, преподавателей и читателей, интересую-
щихся вопросами эксплуатации электротехнического оборудования.

УДК [621.3:69](075.8)
ББК 31.2я73-1+38я73-1

© А. Е. Ачкасов, В. А. Лушкин,
В. Н. Охрименко и др., 2010

© ХНАГХ, 2010

© А. Е. Ачкасов, В. А. Лушкин, В. Н. Охрименко,
Воронкова Т. Б., 2-е изд. испр. и доп., 2015

© ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2015

ISBN 978-966-695-367-7

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
Раздел I. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ...	9
1 Основные термины и понятия	10
1.1 Электрическая цепь и ее элементы	10
1.2 Классификация электрических токов, ЭДС и напряжений	10
1.3 Элементы электрических цепей и их графические изображения	12
1.4 Положительные направления токов, ЭДС и напряжений	18
1.5 Общие правила выполнения электрических схем	20
2 Физические процессы в цепях постоянного тока	23
2.1. Закон Ома	23
2.2. Режимы работы источника постоянного тока	24
2.3. Обобщенный закон Ома для участка цепи	27
2.4. Работа и мощность постоянного тока	29
2.5. Условия отдачи источником максимальной мощности	33
2.6. Схемы соединения элементов цепи	34
2.7 Законы Кирхгофа	43
3 Методы расчета сложных цепей постоянного тока	50
3.1 Применение законов Кирхгофа для анализа сложных цепей	50
3.2 Метод узловых потенциалов	52
3.3 Метод контурных токов	54
3.4 Принцип суперпозиции (метод наложения)	57
3.5 Принцип взаимности	58
3.6 Метод эквивалентного генератора	60
Раздел II. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	65
4 Физические процессы в цепях переменного тока	65
4.1 Основные сведения о переменном токе	65
4.2 Элементы схемы замещения с изменяющимися токами	67
4.3 Действующие и средние значения периодических напряжений и токов	70
4.4 Представление синусоидальных напряжений и токов на плоскости декартовых координат	71
4.5 Комплексная форма представления синусоидальных напряжений и токов	76
4.6 Действующие и средние значения синусоидальных напряжений и токов	78
4.7 Комплексная форма записи законов Кирхгофа	79
5 Электрические цепи однофазного переменного тока.....	83
5.1 Электрическая цепь с резистивным элементом	83
5.2 Электрическая цепь с идеальной индуктивной катушкой	86
5.3 Электрическая цепь с идеальным конденсатором	89
5.4 Электрическая цепь с реальной индуктивной катушкой	92
5.5 Мощность индуктивной катушки	95

5.6 Последовательное соединение резистора и идеального конденсатора	98
5.7 Последовательное соединение индуктивной катушки и конденсатора	101
5.8 Цепь переменного тока с параллельно соединенными приемниками	104
5.9 Активные и реактивные составляющие проводимости и тока	106
5.10 Повышение коэффициента мощности в цепях переменного тока	109
6 Трехфазные цепи электрического тока	114
6.1 Основные понятия и определения	114
6.2 Схемы соединения обмоток трехфазного генератора	116
6.3 Соединение трехфазных потребителей звездой	117
6.4 Соединение трехфазных потребителей треугольником	120
6.5 Трехфазные четырехпроводные электрические сети	121
6.6 Активная, реактивная и полная мощность трехфазной электрической сети	124
6.7 Сравнение условий работы приемника при соединении его фаз треугольником и звездой	125
Раздел III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	128
7 Электроизмерительные приборы	128
7.1 Основные понятия	128
7.2 Классификация электроизмерительных приборов	130
7.3. Общие технические характеристики электроизмерительных приборов	131
7.4 Приборы магнитоэлектрической системы	132
7.5 Приборы электромагнитной системы	134
7.6 Электродинамические и ферродинамические приборы	136
7.7 Измерительные преобразователи	137
7.8 Электронные аналоговые электроизмерительные приборы	142
7.9 Цифровые электроизмерительные приборы	143
8 Методы электрических измерений	146
8.1 Погрешности и ошибки измерений	146
8.2 Классификация методов электрических измерений	149
8.3 Измерительные схемы	150
8.4 Измерение тока и напряжения	154
8.5 Измерение мощности и электрической энергии	158
8.6 Измерение неэлектрических величин	164
Раздел IV. ТРАНСФОРМАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	167
9 Трансформаторы	170
9.1 Общие сведения о трансформаторах	170
9.2 Однофазный трансформатор	171
9.3 Паспортные параметры и внешняя характеристика трансформатора	175
9.4 Трехфазные трансформаторы	178

9.5 Автотрансформаторы	179
9.6 Измерительные трансформаторы	181
10 Электрические машины постоянного тока	184
10.1 Устройство машины постоянного тока	184
10.2 Принцип действия генератора постоянного тока	187
10.3 Реакция якоря	188
10.4 Коммутация в машинах постоянного тока	190
10.5 Потери энергии и КПД	192
10.6 Схемы включения обмоток возбуждения	193
10.7 Номинальные параметры и характеристики машины постоянного тока	194
10.8 Генераторы постоянного тока	195
10.9 Электродвигатели постоянного тока	201
11 Асинхронные электрические машины	212
11.1 Устройство и принцип действия трехфазной асинхронной машины	212
11.2 ЭДС статора и ротора	216
11.3 Уравнения электрического равновесия статора и ротора	218
11.4 Уравнения намагничивающих сил и токов	220
11.5 Схема замещения асинхронного двигателя	222
11.6 Потери и КПД асинхронного электродвигателя.....	224
11.7 Вращающий момент асинхронного двигателя	225
11.8 Рабочие характеристики асинхронного двигателя	229
11.9 Пуск асинхронных двигателей	230
11.10 Механические характеристики асинхронного двигателя в тормозных режимах	233
11.11 Однофазный асинхронный двигатель	236
12 Синхронные электрические машины	241
12.1 Устройство синхронных машин	241
12.2 Синхронный генератор	243
12.3 Внешняя характеристика синхронного генератора	245
12.4 Электромагнитный момент синхронного генератора	246
12.5 Параллельная работа синхронной машины с электрической сетью	248
12.6 Синхронный двигатель	252
12.7 Пуск в ход синхронного двигателя	253
12.8 Регулирование коэффициента мощности синхронного двигателя	255
12.9 Рабочие характеристики синхронного двигателя	257
12.10 Сравнение синхронных и асинхронных двигателей	258
Раздел V. ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	261
13 Основы промышленной электроники	261
13.1 Элементы полупроводниковой техники	262
13.2 Полупроводниковые выпрямители	273

13.3 Сглаживающие фильтры	292
13.4 Усилители	294
14 Общие сведения об электроприводе	300
14.1 Основные понятия	300
14.2 Механика электропривода	303
14.3 Уравнение движения электропривода	306
14.4 Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей	308
14.5 Выбор электродвигателя	313
15 Регулирование скорости электропривода	320
15.1 Основные показатели регулирования угловой скорости электроприводов	320
15.2 Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения	322
15.3 Регулирование угловой скорости асинхронных двигателей	329
РАЗДЕЛ VI. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК, ПРЕДПРИЯТИЙ И ЗДАНИЙ	336
16 Электрооборудование сварочных установок	336
16.1 Виды электрической сварки	336
16.2 Основные требования к источникам питания сварочной дуги	338
16.3 Сварочные преобразователи постоянного тока	339
16.4 Сварочные аппараты переменного тока	341
16.5. Установки контактной сварки	344
17 Электрооборудование подъемно-транспортных машин	347
17.1 Общие сведения о подъемно-транспортных машинах	347
17.2 Электродвигатели подъемно-транспортных машин	348
17.3 Элементы аппаратуры управления	351
17.4 Электрический привод строительных кранов	364
18 Электрические ручные машины	371
18.1 Общие сведения	371
18.2 Изоляция электрических ручных машин	372
18.3 Примеры конструкций электрических ручных машин	373
18.4 Эксплуатация и ремонт электрических ручных машин	376
19 Электропрогрев бетона и грунта	380
19.1 Электропрогрев бетона	380
19.2 Электропрогрев грунта	385
19.3 Техника безопасности при электропрогреве	387
20 Электроосветительные установки	389
20.1 Общие сведения	389
20.2 Источники света и осветительная арматура	390
20.3 Установки для электрического освещения	393
20.4 Нормы освещенности и упрощенные способы расчета осветительных установок	396

21 Электрооборудование инженерных систем зданий	399
21.1 Общие сведения	399
21.2 Системы вентиляции и кондиционирования	400
21.3 Лифты и эскалаторы	401
21.4 Элементы систем водоснабжения	403
21.5 Электрическое отопление	405
22 Электробезопасность в строительстве	408
22.1 Общие сведения	408
22.2 Действие электрического тока на организм человека	408
22.3 Классификация условий работы по степени электробезопасности	411
22.4 Мероприятия по обеспечению безопасного ведения работ с электроустановками	412
22.5 Защитное заземление и зануление	414
Раздел VII. ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ ИХ РЕШЕНИЯ	418
23 Цепи постоянного тока	418
24 Цепи однофазного переменного тока	427
25 Цепи трехфазного тока	436
26 Электрические измерения	441
27 Трансформаторы	444
28 Машины постоянного тока	448
29 Асинхронные машины	450
30 Электрический привод	453
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	458
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	459
ПРИЛОЖЕНИЯ	463
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	473

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительное производство характеризуется широким применением различного оборудования для механизации и автоматизации технологических процессов. Строительные краны, подъемники, лифты, сварочные аппараты, осветительные установки и другое оборудование характеризуется использованием электрической энергии для реализации его функционального назначения. Удельный вес электротехнического оборудования в составе инженерных систем современных зданий постоянно растет. В этих условиях инженер-строитель должен понимать физику работы электротехнического оборудования, его характеристики, особенности использования, критерии выбора и правила безопасной эксплуатации.

Учебными планами строительных специальностей вузов предусмотрено изучение дисциплины «Электротехника в строительстве». Ряд тем данного курса традиционно рассматривается в нескольких дисциплинах электротехнических специальностей. Это вопросы теории электрических цепей, электрических машин, промышленной электроники, электропривода. А вопросы электрооборудования строительных площадок, инженерных систем зданий и предприятий строительной индустрии находят отражение только в специальной литературе.

Цель издания данного учебника – сконцентрировать в одном источнике информацию по всем темам дисциплины «Электротехника в строительстве». Содержание книги и методика изложения материала направлены, в первую очередь, на студентов строительных специальностей. Книга рассчитана также на инженерно-технических работников, которые не являются специалистами в области электротехники, но на практике решают задачи по применению и эксплуатации электрооборудования и желают получить представление об основных принципах его работы.

Практическая часть учебника представлена задачами с примерами их решения и вариантами исходных данных для самостоятельного решения.

Данное издание учебника подготовлено авторским коллективом в составе:

- Ачкасов А. Е. – темы 9, 17, 18, 22, раздел VII;
- Лушкин В. А. – темы 1, 7, 12, 19, 20, раздел VII;
- Охрименко В. Н. – темы 3, 5, 6, 11, 13, 16, 21, общее редактирование;
- Воронкова Т. Б. – темы 2, 4, 7, 8, 10, 14, 15.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам: доктору технических наук, академику АТН Украины Ю. Г. Куцану; доктору технических наук, профессору, директору института энергосбережения и энергоменеджмента НТУ Украины "КПИ" А. В. Праховнику; заслуженному изобретателю Украины, доктору технических наук, профессору кафедры энергоустановок космических летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского (ХАИ), академику АНВО Украины А. И. Яковлеву за полезные замечания и советы относительно содержания и методики изложения материала учебника.

Раздел I. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Первые электротехнические устройства работали на постоянном токе. Однако по мере возрастания потребностей в электрической энергии все более проявлялся ее *основной недостаток – невозможность передачи электрической энергии постоянного тока на большие расстояния.*

Современное производство, передача, распределение и использование электрической энергии осуществляются в основном посредством устройств переменного тока. Широкому применению переменного тока способствовала возможность экономичной передачи большого количества электрической энергии от места ее производства (электростанций) к местам ее потребления (электроприемникам). Важным фактором явилась также относительная простота и экономическая эффективность генераторов, двигателей и других устройств переменного тока.

Однако, несмотря на господствующее положение переменного тока в современной жизни, многие потребители используют постоянный ток. Это потребители, установки которых не могут работать на переменном токе, например, электрохимические. В некоторых отраслях техники установки постоянного тока обеспечивают более высокие технико-экономические показатели, чем установки переменного тока.

Устройства постоянного тока широко используются также на строительных площадках и предприятиях строительной индустрии, на транспорте, в электрооборудовании кораблей, космических устройств, самолетов, автомобилей, в системах автоматики и вычислительной техники.

В первых двух разделах курса "Электротехника в строительстве" рассматриваются основные вопросы теории электрических цепей. Основное внимание уделено изучению цепей переменного тока, так как процессы в них более сложны, чем в цепях постоянного тока. В третьем разделе рассмотрены вопросы электрических измерений, которые логически связаны с электрическими цепями как постоянного, так и переменного тока. Четвертый раздел учебника посвящен изучению электрических машин постоянного и переменного тока, в частности, особенностей асинхронных электродвигателей, синхронных генераторов и синхронных двигателей, а также трансформаторов. В пятом разделе рассмотрены основные устройства промышленной электроники и изложены основы управляемого электропривода, включая вопросы его механики, выбора электродвигателя и способы регулирования угловой скорости электроприводов. Шестой раздел содержит сведения об основном электрооборудовании строительных площадок, в частности, о сварочных установках, подъемно-транспортных и ручных машинах, а также об электрооборудовании инженерных систем задний и электробезопасности. Седьмой раздел посвящен рассмотрению практических примеров решения задач и содержит варианты задач для самостоятельного решения.

1 ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

Ключевые понятия: электрическая цепь, участок цепи, источники, потребители, электрический ток, ЭДС, напряжение, постоянный ток, переменный ток, линейный элемент, нелинейный элемент, неразветвленная цепь, разветвленная цепь, сопротивление, индуктивность, емкость, взаимная индуктивность, пассивный элемент, активный элемент, схема соединения цепи, схема замещения цепи, активный и пассивный двухполюсники, последовательное и параллельное соединение, контур, узел, ветвь.

1.1 Электрическая цепь и ее элементы

Электрической цепью называют совокупность устройств, предназначенных для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии. Отдельные устройства, входящие в электрическую цепь, называют *элементами электрической цепи*. Часть электрической цепи, содержащую выделенные в ней элементы, называют *участком цепи*.

Элементы цепи, предназначенные для генерирования электрической энергии, называют *источниками питания* или *источниками электрической энергии*. Элементы, использующие электрическую энергию, называют *приемниками электрической энергии*.

В источниках питания электрическая энергия получается за счет преобразования из других видов энергии: механической, химической, тепловой, световой и т. п.

В приемниках, наоборот, электрическая энергия преобразуется в иные виды энергии: механическую в электрических двигателях, химическую в аккумуляторах, тепловую в нагревательных приборах и печах, лучистую в осветительных приборах и т. д.

Передающие элементы цепи связывают источники и приемники электрической энергии между собой. Кроме электрических проводов, к этой группе относятся также приборы контроля и управления, преобразующие устройства (трансформаторы, выпрямители и др.), которые доводят электрическую энергию до состояния, в котором ее становится удобно передавать на расстояния и распределять между приемниками.

1.2 Классификация электрических токов, ЭДС и напряжений

При замыкании электрической цепи, имеющей источник электрической энергии, появляется направленное движение носителей электрических зарядов - *электрический ток*.

Величина или сила электрического тока определяется количеством электричества (зарядом), проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени.

Электрический ток, величина и направление которого остаются неизменными во времени, называют **постоянным током** (рис. 1.1, *a*) и обозначают прописной буквой I . Если за t секунд через поперечное сечение проводника прошло q кулонов электрического заряда, то сила постоянного тока

$$I = q/t. \quad (1.1)$$

Отсюда заряд, который переносит постоянный ток за время t ,

$$q = I \cdot t. \quad (1.2)$$

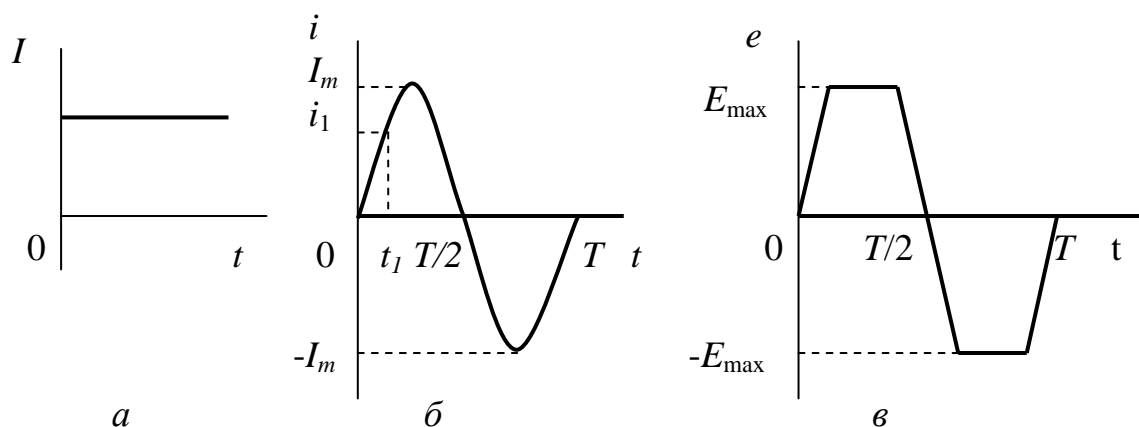


Рисунок 1.1 – Различные формы кривых постоянных и периодических токов (*a* и *б*) и ЭДС (*в*)

Электрический ток, величина или направление которого во времени изменяются, называют **изменяющимся** или **переменным током**. Значения изменяющегося тока в конкретный рассматриваемый момент времени называют мгновенными значениями и обозначают строчной буквой i . Ток i связан с зарядом q и временем t соотношением

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1.3)$$

За промежуток времени от 0 до t изменяющийся ток переносит заряд

$$q = \int_0^t i \cdot dt. \quad (1.4)$$

Основной электрической единицей в Международной системе единиц измерения (СИ) является единица силы тока Ампер (А). Заряд в этой системе измеряется в Ампер-секундах (А·с), или Кулонах (Кл). Заряд в 1 Кл соответствует заряду $6,24 \cdot 10^{18}$ электронов. При токе в 1 А через поперечное сечение проводника за 1 с проходит заряд, равный заряду $6,24 \cdot 10^{18}$ электронов.

Формы кривых изменяющихся токов весьма разнообразны. Доминирующее значение среди них имеют периодические токи. **Периодическим** называют такой ток, мгновенные значения которого повторяются через

равные промежутки времени. Наименьший промежуток времени, по истечении которого мгновенные значения тока повторяются, называют **периодом** и обозначают буквой T . Число периодов в одну секунду называют **частотой** периодического тока. Частоту измеряют в Герцах (Гц) и обозначают буквой f . Частота и период связаны соотношением

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.5)$$

Ток, изменяющийся по гармоническому закону, называют **синусоидальным током** (рис. 1.1, б). Синусоидальный ток промышленной частоты 50 Гц принято называть **переменным током**, хотя в теории цепей под переменным током понимают любой изменяющийся ток.

Если закон изменения мгновенных значений периодического тока (напряжения) отличен от гармонического, то такой ток (напряжение) называют **несинусоидальным** (рис. 1.1, в).

Наибольшее значение синусоидального тока называют **амплитудой** и обозначают прописной буквой I с нижним индексом m (I_m). Наибольшее значение несинусоидального тока обозначают строчной буквой i с нижним индексом max (i_{max}).

Постоянные или изменяющиеся токи возникают в электрических цепях под действием **электродвижущих сил** (ЭДС), возбуждаемых в источниках в процессе преобразования в них какого-либо вида энергии в электрическую энергию. ЭДС и напряжения, по аналогии с токами, в соответствии с законом изменения их мгновенных значений называют постоянными, изменяющимися, синусоидальными и несинусоидальными. Постоянные ЭДС и напряжения обозначают прописными буквами E и U соответственно, а изменяющиеся ЭДС и напряжения - строчными буквами e и u . Единицей измерения ЭДС и напряжения является **Вольт** (В).

Режим работы электрической цепи и ее элементов определяется совокупностью величин, характеризующих воздействие на цепь электродвижущей силы, и возникающих в результате этого воздействия напряжений и токов.

1.3 Элементы электрических цепей и их графические изображения

В зависимости от характера тока, протекающего в электрической цепи, ее называют "**электрическая цепь постоянного тока**" или "**электрическая цепь переменного тока**", соответственно. В некоторых случаях, когда требуется уточнение, говорят "**электрическая цепь синусоидального (несинусоидального) тока**".

Аналогично именуют и элементы цепей: "электрическая машина постоянного тока", "электрическая машина переменного тока", "источник постоянного тока", "приемник переменного тока" и т. д.

Элементы цепей и составленные из них цепи подразделяют так же по виду характеристик, выражающих, например, зависимость тока от приложенного напряжения $I(U)$ – ампер-вольтная характеристика (АВХ). Примеры таких характеристик приведены на рисунке 1.2. Элементы цепей, АВХ которых линейны, называют *линейными элементами*. Нелинейные характеристики имеют *нелинейные элементы*.

Электрические цепи постоянного и переменного токов различают также по способу соединения их элементов – *неразветвленные и разветвленные цепи*, по числу источников электрической энергии – цепи с одним и несколькими источниками электрической энергии.

Электрическую цепь, состоящую из линейных элементов, называют *линейной цепью*. Электрическую цепь, в которую входит хотя бы один нелинейный элемент, называют *нелинейной цепью*.

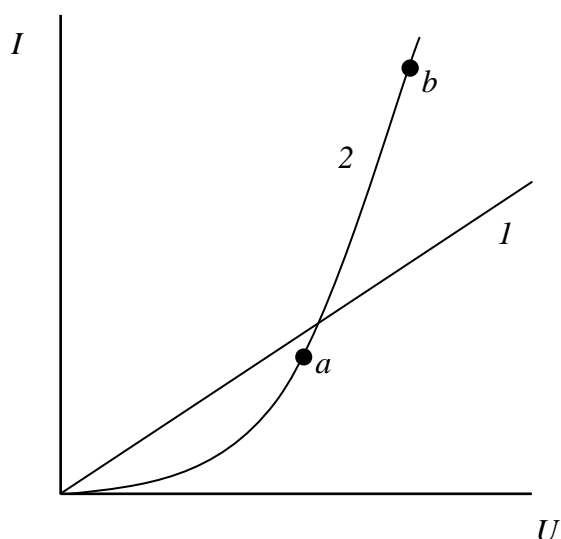


Рисунок 1.2 – Характеристики элементов цепи: 1 – линейная, 2 – нелинейная

Расчеты режимов нелинейных цепей сложны, поэтому для упрощения их выполняют на линейных участках характеристик нелинейных элементов, например, участок $a-b$ характеристики 2 на рисунке 1.2.

Приемники электрической энергии, как элементы электрической цепи, обладают свойствами поглощать электрическую энергию из цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии (*необратимый процесс*), или создавать свои магнитные и электрические поля, энергия которых может накапливаться и

при определенных условиях возвращаться обратно в цепь (*обратимый процесс*). Для характеристики этих свойств вводят понятие параметров элемента. Различают такие параметры элемента цепи как сопротивление, индуктивность и емкость.

Сопротивление (R) – параметр, характеризующий свойство элемента поглощать энергию электрической цепи, преобразуя ее в тепловую или световую энергию. Известно, что мощность (P, p) преобразования электрической энергии пропорциональна квадрату тока (I^2, i^2) и величине сопротивления R , т. е. $P = I^2 R$, откуда сопротивление определяется отношением $R = P/I^2$ для постоянного тока и $R = p/i^2$ для переменного тока. *Единицей измерения сопротивления является Ом.*

Свойство элемента цепи создавать магнитное поле (поле самоиндукции) при протекании в нем электрического тока характеризуют параметром индуктивности L . **Индуктивность** представляет собой коэффициент

пропорциональности между током (I, i) и потокосцеплением (ψ, ψ_i) данного элемента цепи, т. е. $\psi = L \cdot I$ или $\psi_i = L \cdot i$. Этот коэффициент пропорциональности L называют коэффициентом самоиндукции и измеряют в Генри (Г).

При наличии в электрической цепи двух индуктивных элементов возникает явление **взаимной индукции**. Параметр **взаимной индуктивности** M характеризует свойство одного элемента с током i_1 создавать магнитное поле в витках другого элемента. Он является коэффициентом пропорциональности между током первого элемента I_1 или i_1 и созданным этим током потокосцеплением второго элемента $\psi_{21} = M \cdot I_1$ или $\psi_{21t} = M \cdot i_1$. Потокосцепление ψ_{21} называют **потокосцеплением взаимной индукции** второго элемента.

Аналогичная связь имеется между потокосцеплением первого элемента ψ_{12} и током I_2 или i_2 второго элемента: $\psi_{12} = M \cdot I_2$ или $\psi_{12t} = M \cdot i_2$.

Емкость (C) – параметр, характеризующий свойство элемента накапливать заряды и возбуждать этим электрическое поле. Этот параметр является коэффициентом пропорциональности между напряжением и зарядом, накопленным элементом: $q = C \cdot U$.

В общем случае **любой реальный элемент** электрической цепи обладает всеми тремя параметрами R, L и C .

Основное свойство источника электрической энергии – способность создавать и поддерживать разность потенциалов на отдельных участках цепи, а также возбуждать и поддерживать электрический ток в замкнутой цепи. Его характеризуют **электродвижущей силой** (ЭДС). Величина ЭДС (E, e) равна энергии, которую приобретает положительный заряд величиной в 1 Кл, перемещаясь под действием сторонних сил внутри источника электрической энергии. Если за время dt в источнике переменного тока проходит заряд $dq = i \cdot dt$, то развиваемая источником энергия $dW = e \cdot dq = e \cdot i \cdot dt$, тогда мгновенная мощность $p = dW/dt = e \cdot i$. Для источника постоянного тока энергия и мощность соответственно равны $W = E \cdot I \cdot t$ и $P = E \cdot I$.

Протекание электрического тока внутри источника сопровождается потерями энергии источника на нагрев. Величина этих потерь зависит от величины **сопротивления источника** R . Поэтому параметр сопротивления наряду с ЭДС является важнейшим параметром источника электрической энергии. В некоторых случаях в источниках переменного тока учитывают также параметр индуктивности L .

Элементы цепи, работу которых можно описать с помощью параметров R, L, M и C , называют **пассивными**. Термин "пассивный" подчеркивает, что такие элементы не могут выполнить свое назначение без воздействия на них посторонних источников электрической энергии.

Элементы цепи, для описания работы которых, кроме пассивных параметров, необходимо вводить ЭДС или ток, называют **активными**. К ак-

тивными элементами относят все источники электрической энергии и некоторые приемники, при описании процессов в которых нельзя ограничиться только пассивными параметрами, например, аккумуляторы при зарядке, двигатели постоянного тока и др.

Элементы цепи, обладающие только одним параметром, называются идеальными. Идеальный источник ЭДС имеет только параметр E (величина ЭДС – рис. 1.3, а), идеальный источник тока – только параметр J (величина тока – рис. 1.3, в), идеальный индуктивный элемент (идеальная индуктивная катушка) – только параметр L (рис. 1.3, г), идеальный емкостный элемент (идеальный конденсатор) – только параметр C (рис. 1.3, д); только один параметр R имеет резистивный элемент (резистор) (рис. 1.3, е). В общем случае любое реальное пассивное устройство обладает тремя параметрами R, L, C .

Источники электрической энергии подразделяются на источники ЭДС и источники тока. Их схемы замещения показаны на рисунке 1.4. Свойства источника электрической энергии определяются его вольт-амперной (внешней) характеристикой, представляющей собой зависимость выходного напряжения от тока $U(I)$.

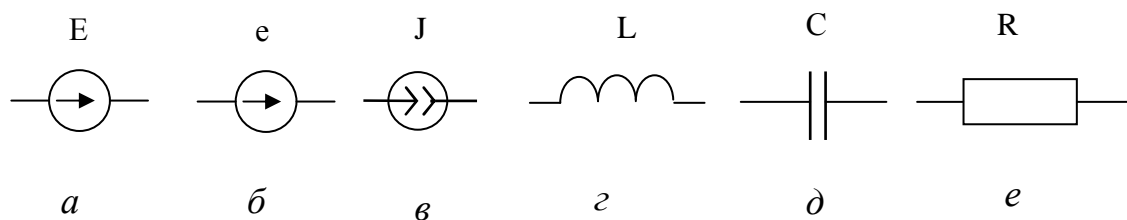


Рисунок 1.3 – Графические обозначения идеальных элементов: источника ЭДС постоянного тока (а), источника ЭДС изменяющегося тока (б), источника тока (в), индуктивности (г), емкости (д), резистора (е)

Если в схеме цепи внутреннее сопротивление источника электрической энергии R_0 мало по сравнению с сопротивлением нагрузки R_H ($R_0 \ll R_H$), то справедливо неравенство $R_0 \cdot I \ll E$. В этом случае напряжение между выводами источника электрической энергии практически не зависит от тока цепи, т. е. $U = E = \text{const}$, и источник называется **источником ЭДС**.

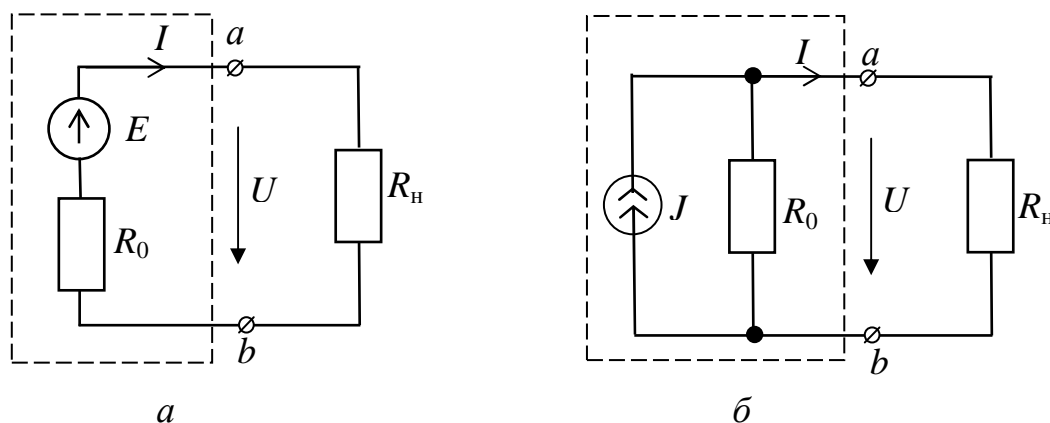


Рисунок 1.4 – Схемы замещения источников ЭДС (а) и тока (б)

Источник с малым внутренним сопротивлением можно заменить идеальной моделью у которой $R_0 = 0$. Такой источник называют **идеальным источником ЭДС** с одним параметром $E = U$. Напряжение на выходных зажимах идеального источника ЭДС не зависит от тока, а его внешняя характеристика имеет вид прямой $U = E = \text{const}$ (рис. 1.5, а).

Если в схеме цепи внутреннее сопротивление источника электрической энергии во много раз превышает сопротивление нагрузки ($R_0 \gg R_n$), то ток цепи $I = E/(R_0 + R_n) \approx E/R_0 = J = \text{const}$ не зависит от сопротивления нагрузки и источник называется **источником тока**.

Источник с большим внутренним сопротивлением можно заменить идеальной моделью, у которой $R_0 = \infty$ и $E = \infty$, и для которой справедливо выражение $E/R_0 = J$. Такой источник называют **идеальным источником тока** с одним параметром J . Ток источника тока не зависит от напряжения на его выходных зажимах, а его внешняя характеристика имеет вид прямой $I = J = \text{const}$ (рис. 1.5, б).

Графическое изображение электрической цепи при помощи условных изображений ее элементов называют **схемой цепи**. Элементы электри-

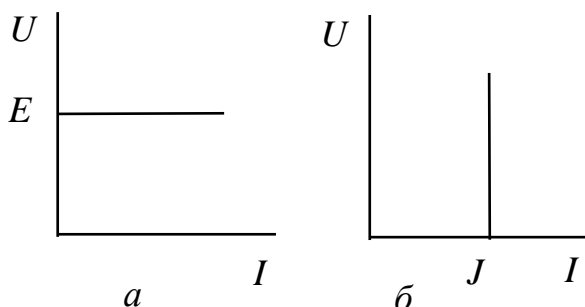


Рисунок 1.5 – Внешние характеристики:

- а – идеального источника ЭДС;
- б – идеального источника тока.

ческих цепей на схемах изображают при помощи условных графических обозначений. Схемы позволяют получить наглядное представление о структуре электрической цепи, порядке соединения ее элементов.

На рисунке 1.6 в качестве примера приведена схема соединения электрической цепи постоянного тока, состоящая из источника (аккумуляторной батареи) E с внутренним сопротивлением R_0 , амперметра PA , выключателя S и приемника (электрической лампочки HL).

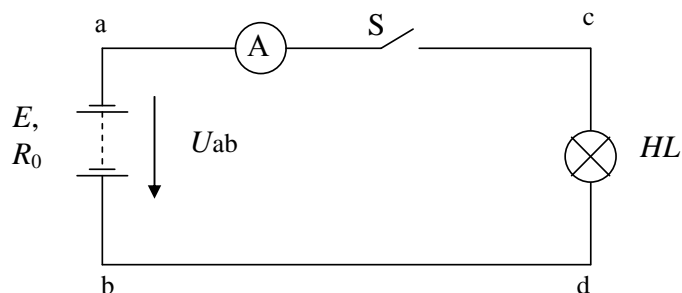


Рисунок 1.6 – Схема соединений простейшей электрической цепи

Изучение свойств электрической цепи и ее элементов с учетом всех параметров весьма сложно, и для упрощения анализа реальную цепь представляют ее моделью – набором идеальных элементов.

Графическое изображение цепи с помощью идеальных элементов, параметрами которых являются параметры заме-

щаемых элементов, называют **схемой замещения цепи**. Идеальные элементы вводят в схему замещения, чтобы учесть явления, характеризующиеся их параметрами, которые оказывают существенное влияние на физические процессы в цепи. Параметры реальных элементов, которые не оказывают существенного влияния на физические процессы, в схеме замещения не учитывают. Например, чтобы учесть процесс поглощения энергии элементом цепи, в схему замещения вводят резистивный элемент. Индуктивные и емкостные элементы вводят в схему замещения в том случае, когда хотят учесть влияние магнитных и электрических полей.

Таким образом, в схеме замещения один и тот же элемент цепи может быть изображен по-разному, в зависимости от назначения этой схемы. Например, для учета нагрева индуктивной катушки в цепи постоянного тока ее представляют в схеме замещения только одним резистивным элементом. Для изучения физических процессов в индуктивной катушке в цепи переменного тока ее представляют уже двумя последовательно соединенными идеальными элементами - резистивным и индуктивным. А при изучении работы индуктивной катушки в цепи тока высокой частоты, для нее составляют схему замещения из резистивного, индуктивного и емкостного идеальных элементов.

При разработке проектной и конструкторской документации на электрооборудование применяются электрические схемы, которые, в отличие от схем замещения, выполняются в строгом соответствии с действующими стандартами, например, стандартами ЕСКД – Единой системы конструкторской документации. При разработке стандартов на правила оформления графических документов учитываются рекомендации международных организаций: ИСО (Международная организация по стандартизации), МЭК (Международная электротехническая комиссия) и др. В соответствии с требованиями ЕСКД различают **схемы электрические принципиальные, структурные, функциональные, монтажные**.

В качестве примера на рисунке 1.7 показана схема замещения цепи переменного тока, состоящей из источника переменной ЭДС e , конденсатора C и осветительной лампы HL . На примере этой схемы рассмотрим наименования отдельных участков и всей цепи.

Источник питания образует **внутренний участок цепи**, а приемники совместно с соединительными проводами - **внешний участок цепи** или просто внешнюю цепь. Зажимы (полюса) a и b источника, к которым присоединяют внешнюю цепь, называют **выходными зажимами** (полюсами) источника. Зажимы a и b одновременно являются и входными зажимами внешней цепи. В некоторых случаях внешнюю цепь разбивают на два характерных участка - линию электропередачи (соединительные провода) и потребитель электрической энергии (электроприемник). На рисунке 1.7 участки $a-c$ и $b-d$ образуют линию электропередачи с двумя сопротивлениями $R_{л}$, а участок $c-d$ с подключенными конденсатором C и лампой накаливания

HL представляет собой электроприемник. В данном случае зажимы $c-d$ являются входными зажимами электроприемника.

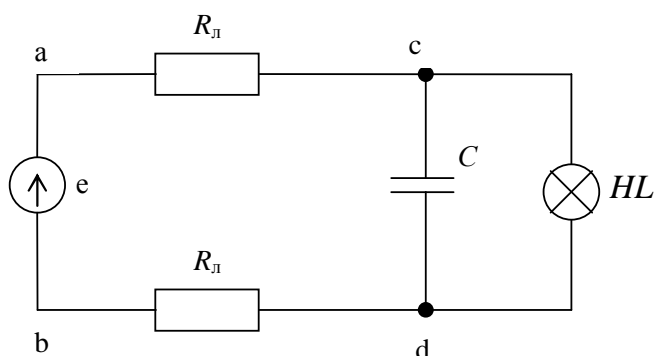


Рисунок 1.7 – Схема цепи переменного тока

Зажимы внешней цепи, при помощи которых ее присоединяют к проводам, идущим от источника, называют **входными зажимами** (полюсами) внешней цепи.

Часть цепи, имеющую два полюса, называют двухполюсником. Различают **двухполюсники активные** (содержащие источники электрической энергии) и **пассивные** (не содержащие источников электрической энергии).

Соединение элементов цепи, при котором по всем участкам проходит один и тот же ток, называют **последовательным соединением**. Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким участкам, называют **контуром электрической цепи**. Цепь, схема которой показана на рисунке 1.6, является одноконтурной цепью, состоящей из последовательно соединенных элементов.

Участок цепи, вдоль которого в любой момент времени ток имеет одно и то же значение, называют **ветвью**, а место соединения трех или большего числа ветвей – **узлом**.

Соединение, при котором две или более ветвей присоединены к одной паре узлов, называют параллельным соединением. На рисунке 1.7 показана схема с двумя узлами c и d , к которым подключены два приемника (лампа HL и конденсатор C), соединенные параллельно. Параллельно соединенные участки находятся под одним и тем же напряжением. Электрическую цепь с параллельными и последовательными ветвями называют разветвленной цепью. Разветвленная цепь является многоконтурной. Контуры, которые отличаются друг от друга хотя бы одной ветвью, являются независимыми. Схема на рисунке 1.7 является двухконтурной.

1.4 Положительные направления токов, ЭДС и напряжений

Для однозначности описания процессов, происходящих в каком-либо элементе цепи, необходимо знать не только величины его тока и напряжения, но также их направления в рассматриваемый момент времени. На основании графика изменения тока (см. рис. 1.1, б) или его уравнения можно утверждать, что ток через полупериод $T/2$ изменяет свое направление на противоположное, но направление тока в элементе в момент t_i неизвестно.

Для определенности одно из двух возможных направлений тока в элементе принимают за положительное и указывают его на схеме стрелкой. Стрелки, поставленные на схемах, указывают **положительные направления** ЭДС, напряжений и токов, и значения обозначенных величин считают положительными.

Таким образом, если в заданный момент времени действительные значения величин положительны: $E > 0$, $U > 0$, $I > 0$, $e > 0$, $u > 0$, $i > 0$, то их направления совпадают с направлениями, указанными на схеме стрелками. Если действительные значения этих величин отрицательны, то их направления противоположны направлениям, указанным на схеме стрелками.

Рассмотрим примеры цепей и поясним значение поставленных на их схемах стрелок. На рисунке 1.8 приведены схемы соединений двух простейших цепей постоянного (*а*) и переменного (*б*) токов, состоящих из идеальных источников питания с ЭДС E и e и электрических ламп HL , подключенных непосредственно к внешним зажимам источников.

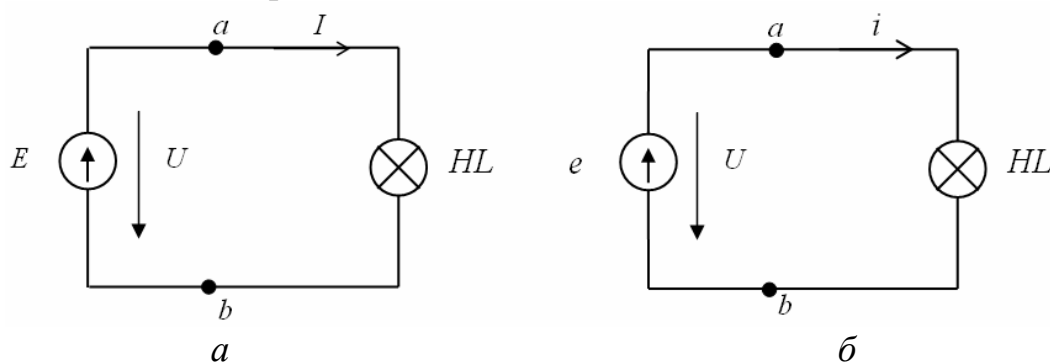


Рисунок 1.8 – Схемы соединений простейших цепей постоянного (*а*) и переменного (*б*) токов с идеальными источниками питания

На рисунке 1.9 показаны схемы замещения этих цепей, на которых электрические лампы представлены резистивными элементами с сопротивлением R .

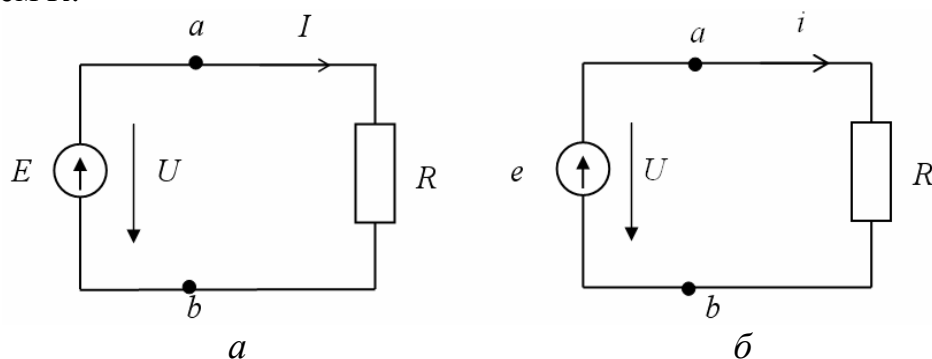


Рисунок 1.9 – Схемы замещения простейших цепей постоянного (*а*) и переменного (*б*) токов с идеальными источниками питания

На рисунке 1.10 изображены графики ЭДС источников питания.

Из курса физики известно, что за положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов, за положительное

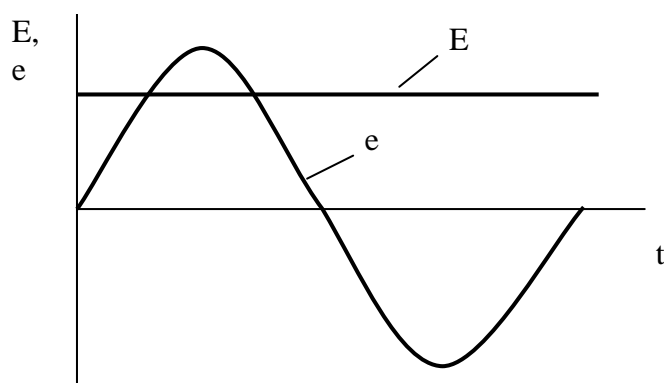


Рисунок 1.10 – Графики ЭДС источников питания: постоянной E и синусоидальной e

направление ЭДС – направление действия сторонних сил на положительный заряд, за положительное направление напряжения – направление убывания потенциала. Так как положительные заряды внутри источника движутся в направлении действия сторонних сил, а в приемнике – в направлении убывания

потенциала, то положительные направления тока и ЭДС источника, тока и напряжения приемника совпадают.

Положительное направление напряжения на внешних зажимах источника противоположно положительному направлению тока источника. В приемнике положительные заряды при этом движутся в направлении убывания потенциала. Развиваемая источником мощность $P = E \cdot I$ или $p = e \cdot i$ и мощность участка цепи $P = U \cdot I$ или $p = u \cdot i$ будут положительны только при совпадающих положительных направлениях ЭДС и тока источника, а также напряжения и тока приемника.

1.5 Общие правила выполнения электрических схем

Схемы применяют при изучении принципа работы машин, механизмов и аппаратов, при их наладке, монтаже и ремонте, для уяснения связи между отдельными составными частями оборудования без уточнения особенностей их конструкции.

Правила выполнения и оформления схем регламентируют стандарты ЕСКД. Виды и типы схем, общие требования к их выполнению должны соответствовать ГОСТ 2.701-84 "ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению", правила выполнения всех типов электрических схем – ГОСТ 2.702-75 "ЕСКД. Правила выполнения электрических схем".

Схемы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, регулировки и эксплуатации оборудования.

Для изображения электрических элементов и устройств и сокращенных сведений о них на схемах применяют графические и буквенно-цифровые обозначения. Виды условных графических обозначений и правила их построения установлены группой стандартов ЕСКД.

Буквенно-цифровые обозначения и правила их построения регламентированы ГОСТ 2.710-81. Для построения обозначений используют прописные буквы латинского алфавита и арабские цифры. Обозначения запи-

сывают в виде последовательности букв и цифр в одну строку без пробелов. В таблице 1.1 в качестве примера приведены буквенные обозначения некоторых элементов электрических схем.

Таблица 1.1 – Буквенные обозначения основных элементов электрических схем

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры вида элементов	Двухбуквенный код
С	Конденсаторы		
G	Генераторы, источники питания	Батарея	GB
K	Реле, контакторы, пускатели	Реле токовое Реле напряжения	KA KV
L	Катушки индуктивности, дроссели	Дроссель люминисцентного освещения	LL
M	Двигатели постоянного и переменного тока		
P	Приборы, измерительное оборудование	Амперметр Вольтметр Ваттметр	PA PV PW
R	Резисторы		
S	Устройства коммутационные	Выключатель или переключатель Выключатель автоматический	SA SF
T	Трансформаторы, автотрансформаторы	Трансформатор тока Трансформатор напряжения	TA TV

Следует отметить, что стандарты ЕСКД распространяются на электрические схемы, входящие в состав проектно-конструкторской документации.

В учебной литературе по электротехнике на схемах замещения применяются традиционно принятые многими авторами обозначения, которые могут несколько отличаться от требований ЕСКД. Например, на схемах замещения источник ЭДС обозначается строчной буквой латинского алфавита *E*, а в соответствии с ЕСКД его обозначают буквой *G* (табл. 1.1). При дальнейшем изложении материала в процессе рассмотрения физических процессов и принципа работы отдельных электротехнических устройств, машин и аппаратов будут использоваться графические и буквенные обозначения элементов электрических схем.

Более подробно с правилами выполнения электрических схем можно ознакомиться в специальной литературе [44].

Выводы

1. Основными элементами электрической цепи являются источники электрической энергии, потребители (приемники) электрической энергии и передающие элементы.
2. Чаще всего используются электрические цепи с переменными (синусоидальными) токами и ЭДС.
3. Элементы электрических цепей подразделяются на активные и пассивные.
4. Основными параметрами пассивных элементов являются сопротивление, индуктивность и емкость.
5. На постоянном токе такие параметры пассивных элементов как емкость и индуктивность равны нулю, т. е. отсутствуют.
6. Схема замещения электрической цепи является моделью реальной цепи, позволяющей выполнять расчеты параметров элементов и процессов в исследуемой электрической цепи.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под электрической цепью? Под участком цепи?
2. Назовите основные элементы электрической цепи и поясните их функциональное назначение.
3. Поясните, что такое электрический ток?
4. Какие существуют виды электрического тока? В каких единицах он измеряется?
5. Что понимают под ЭДС? В каких единицах она измеряется?
6. Чем отличается амплитудное значение переменного тока от максимального значения переменного тока?
7. Приведите пример неразветвленной и разветвленной электрической цепи.
8. В чем отличие нелинейной электрической цепи от линейной?
9. Дайте определение такого параметра электрической цепи как сопротивление. В каких единицах измеряется сопротивление?
10. Дайте определение такого параметра электрической цепи как индуктивность. В каких единицах измеряется индуктивность?
11. Дайте определение такого параметра электрической цепи как взаимоиנדуктивность. В каких единицах измеряется взаимоиנדуктивность?
12. Дайте определение такого параметра электрической цепи как емкость. В каких единицах измеряется емкость?
13. Объясните различие между активными и пассивными элементами электрической цепи.
14. Поясните, что понимают под идеальным элементом электрической цепи? Поясните назначение данного понятия. Приведите примеры.
15. Поясните, что понимают под контуром электрической цепи?
16. Поясните, что понимают под узлом электрической цепи?
17. Какие направления токов и ЭДС принимают за положительные?

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые понятия: закон Ома, режимы источника постоянного тока (номинальный, холостого хода, короткого замыкания, согласованный), ток короткого замыкания, работа электрического тока, мощность электрического тока (полная, полезная, потеря), коэффициент полезного действия, последовательное и параллельное соединение элементов, первый закон Кирхгофа, второй закон Кирхгофа, независимый контур.

2.1 Закон Ома

В 1827 г. немецкий ученый Ом экспериментально вывел закон, устанавливающий зависимость между тремя основными величинами электрической цепи: током, напряжением и сопротивлением.

Закон Ома для полной цепи формулируется следующим образом: *сила тока в электрической цепи прямо пропорциональна величине ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи:*

$$I = \frac{E}{R_{\Pi}}, \quad (2.1)$$

где I – сила тока в цепи, А;

E – ЭДС источника, В;

R_{Π} – полное сопротивление цепи, Ом.

Полное сопротивление цепи R_{Π} представляет собой сумму сопротивлений нагрузки $R_{\text{Н}}$, т. е. внешнего сопротивления цепи, сопротивления питающей нагрузки линии $R_{\text{Л}}$, т. е. сопротивление соединительных проводов, и внутреннего сопротивления источника R_0 :

$$R_{\Pi} = R_{\text{Н}} + R_{\text{Л}} + R_0. \quad (2.2)$$

Для отдельного участка цепи закон Ома имеет вид:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2.3)$$

где I – сила тока на участке цепи, А;

U – падение напряжения на данном участке цепи, В;

R – электрическое сопротивление участка цепи, Ом.

Физический смысл соотношения (2.3) таков, что чем больше разность потенциалов на границах участка цепи, т. е. чем больше падение напряжения на этом участке, тем больше сила тока при фиксированной величине сопротивления. Если при постоянстве напряжения, приложенного к участку цепи, изменять величину сопротивления, то сила тока будет изменяться обратно пропорционально величине сопротивления.

Из закона Ома следует, что

$$U = I R, \quad (2.4)$$

т. е. падение напряжения U (иногда обозначается ΔU) на участке цепи прямо пропорционально силе тока и величине сопротивления. Таким образом, если участке цепи с неизменным сопротивлением возросла сила тока, то падение напряжения на этом участке увеличилось.

Из закона Ома также следует, что

$$R = \frac{U}{I}. \quad (2.5)$$

Соотношение (2.5) позволяет вычислить величину сопротивления участка цепи по известным величинам приложенного к нему напряжения и силе тока. Заметим, что соотношение (2.5) нельзя рассматривать как зависимость величины электрического сопротивления от падения напряжения или силы тока. Известно [23], что электрическое сопротивление проводника зависит от его геометрических размеров и температуры. Однако выражение (2.5) дает возможность опытным путем установить величину сопротивления по измеренным силе тока и падению напряжения на нем.

2.2 Режимы работы источника постоянного тока

Рассмотрим характер изменения напряжения на зажимах a и b источника постоянного напряжения E с внутренним сопротивлением R_0 в зависимости от величины нагрузки R_H (см. рис. 2.1).

В силу того что ЭДС источника (рис. 2.1) равна сумме падений напряжения на внешнем R_H и внутреннем R_0 сопротивлениях цепи можем записать

$$E = U + U_0, \quad (2.6)$$

или

$$U = E - U_0. \quad (2.7)$$

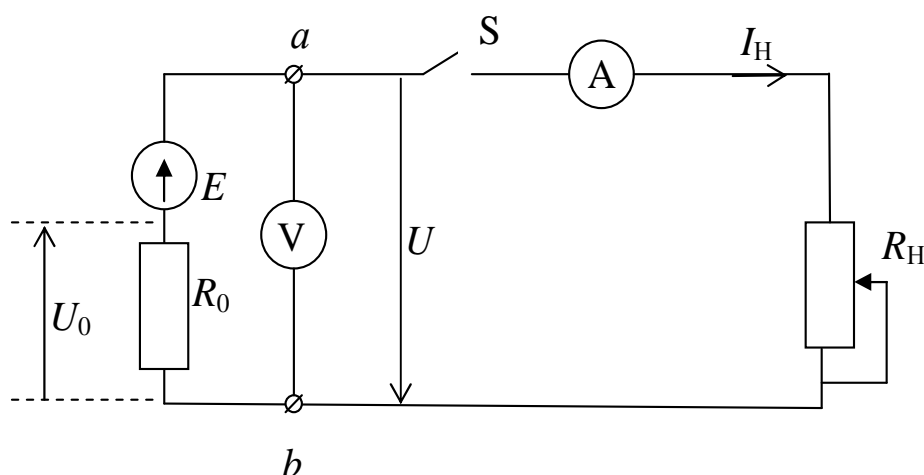


Рисунок 2.1 – Простейшая цепь постоянного тока

Пользуясь законом Ома, величину внутреннего падения напряжения на источнике можем выразить через ток нагрузки I_H и внутреннее сопротивление источника R_0

$$U_0 = I_H \cdot R_0. \quad (2.8)$$

После подстановки (2.8) в (2.7) получим

$$U = E - I_H \cdot R_0. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) определяет зависимость напряжения на зажимах источника от нагрузки, при условии, что величины ЭДС и внутреннего сопротивления источника постоянны.

Рассмотрим возможные режимы работы источника электрической энергии и характер изменения величины его напряжения при изменении нагрузки.

2.2.1 Режим холостого хода. Под режимом холостого хода понимают работу источника электрической энергии при отключенной нагрузке (рис. 2.1, ключ S разомкнут). В этом случае сопротивление внешней цепи бесконечно велико ($R_H = \infty$), и ток в цепи равен нулю:

$$I_H = \frac{E}{R_H + R_0} = \frac{E}{\infty + R_0} = 0. \quad (2.10)$$

При этом *напряжение холостого хода* U_{xx} на зажимах источника составит:

$$U_{xx} = E - 0 \cdot R_0 = E, \quad (2.11)$$

т. е. напряжение холостого хода равно ЭДС источника. Следовательно, вольтметр, подключенный к зажимам источника, при холостом ходе показывает его электродвижущую силу.

2.2.2 Режим короткого замыкания. Режим короткого замыкания источника имеет место, когда величина сопротивления нагрузки практически равна нулю (рис. 2.1, реостат R_H в верхнем положении). Тогда сопротивление электрической цепи минимально и равно сопротивлению соединительных проводов (на схеме замещения рис. 2.1 не показаны), а ток в цепи достигает максимального значения, называемого *током короткого замыкания*:

$$I_{кз} = \frac{E}{0 + R_0} = \frac{E}{R_0}. \quad (2.12)$$

При этом напряжение на зажимах источника будет равно нулю:

$$U = I \cdot R_H = I \cdot 0 = 0, \quad (2.13)$$

а падение напряжения внутри источника будет равно его ЭДС:

$$E = U + U_0 = 0 + U_0 = U_0. \quad (2.14)$$

Следует отметить, что режим короткого замыкания для большинства источников электрической энергии является недопустимым (аварийным), так как внутреннее сопротивление источников обычно мало и возникающий при коротком замыкании ток достигает значительных величин, что приводит к выводу источника энергии из строя.

С целью защиты источников электрической энергии от коротких замыканий в цепь включают защитные устройства (предохранители, автоматические выключатели), размыкающие ее в случае превышения током допустимой величины.

2.2.3 Режим работы на нагрузку. Нагрузкой источника является потребитель электрической энергии. Его сопротивление R_H определяет величину тока нагрузки:

$$I_H = \frac{E}{R_H + R_0}. \quad (2.15)$$

Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше ток нагрузки и, следовательно, нагрузка на источник больше.

Из соотношения (2.9) видно, что увеличение тока нагрузки вызывает уменьшение напряжения на зажимах источника. Эта зависимость линейная, поскольку величины ЭДС и внутреннего сопротивления источника обычно считают неизменными. Ее график представлен на рисунке 2.2.

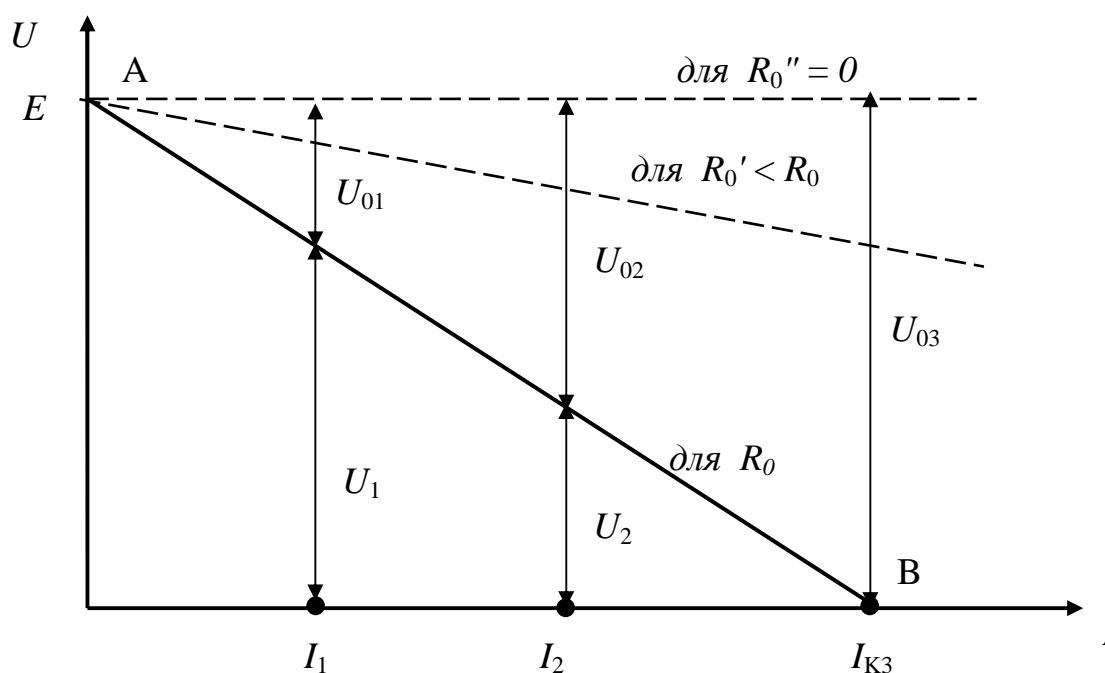


Рисунок 2.2 – Зависимость напряжения источника от тока нагрузки

Точка А соответствует режиму холостого хода: $I = 0$, $U = E$, $U_0 = 0$.

Точка В соответствует режиму короткого замыкания: $I = I_{K3}$, $U = 0$, $U_0 = E$.

При любом промежуточном значении тока нагрузки – I_1 или I_2 напряжение на зажимах источника меньше его ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника:

$$U_1 = E - U_{01} = E - I_1 \cdot R_0; \quad U_2 = E - U_{02} = E - I_2 \cdot R_0.$$

Таким образом, при изменении нагрузки напряжение, подводимое к потребителю, изменяется, что в большинстве случаев является нежелательным. Чтобы обеспечить максимальную стабильность напряжения, следует добиваться минимального внутреннего сопротивления источника. Тогда при одинаковых пределах изменения тока нагрузки изменения напряжения будут меньшими (рис. 2.2 пунктирная линия $R_0' < R_0$).

2.2.4 Номинальный режим. Номинальный режим источника характеризуется тем, что напряжение, ток и мощность в этом режиме соответствуют значениям, на которые источник рассчитан заводом-изготовителем, что гарантирует наилучшие условия работы (экономичность, долговечность и т. п.).

Параметры номинального режима источника обычно указывают в паспорте или на прикрепленном к устройству щитке. Эти данные принимают за основу при расчетах электрических схем.

Основными номинальными данными электротехнических устройств являются *номинальное напряжение U_n и номинальный ток I_n . По номинальному напряжению рассчитывают изоляцию токоведущих частей, а по номинальному току - условия их предельно допустимого нагрева.*

2.2.5 Согласованный режим. Согласованным режимом источника называют режим, при котором он отдает во внешнюю цепь наибольшую мощность.

2.3 Обобщенный закон Ома для участка цепи

Кроме случаев, описанных в п. 2.2.1–2.2.5, существует и другой подход к рассмотрению физики режима работы источника. В основу этого подхода положен учет фактора: отдает источник электрическую энергию или потребляет. В качестве примера можно привести работу аккумулятора. При зарядке он работает в режиме потребления электрической энергии, а при питании электрической лампочки – в режиме источника электрической энергии.

Рассмотрим данный вопрос на примере двух активных участков цепи, схемы которых показаны на рисунке 2.3, *а* и *б*. Для выяснения общих свойств режима участков цепи составим уравнения их электрического состояния.

Первый источник ЭДС работает в режиме источника энергии, так как направления ЭДС E_1 и тока I_1 совпадают. Второй источник ЭДС работает в режиме приемника энергии, так как направления ЭДС E_2 и тока I_2 противоположны. Направления падений напряжения на резистивных элементах участков совпадают с направлениями токов, и следовательно все эти элементы работают как приемники. Направление общего напряжения U_{ab} первого участка, противоположное направлению тока I_1 , позволяет сделать вывод о том, что первый участок генерирует электрическую энергию во внешнюю цепь, которая будет подключена к его зажимам $a - b$.

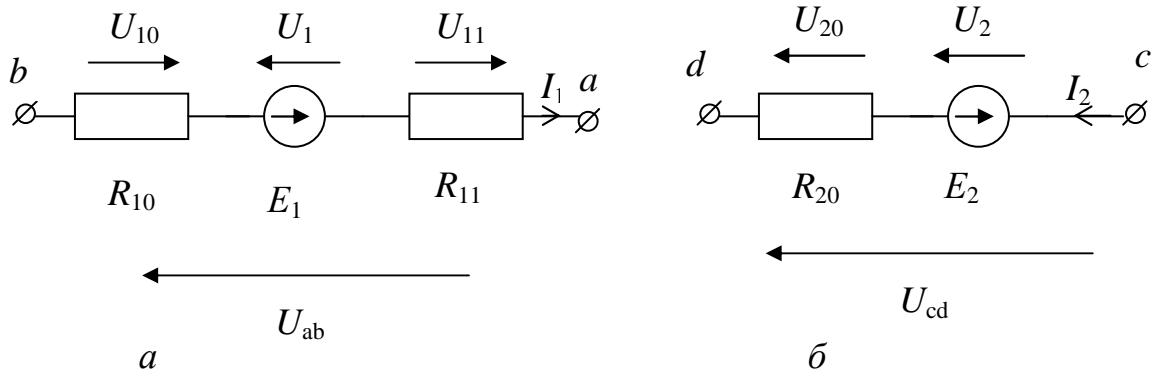


Рисунок 2.3 – Схемы двух активных участков цепи:
a – с противоположными направлениями напряжения U_{ab} и тока I_1 ;
б – с совпадающими направлениями напряжения U_{cd} и тока I_2

Совпадающие направления общего напряжения U_{cd} и тока I_2 второго участка указывают на работу этого участка как активного приемника.

Напряжение участка равно алгебраической сумме напряжений составляющих его элементов; при этом со знаком "+" в уравнения входят напряжения, направления которых совпадают с определяемым напряжением, и со знаком "-" - напряжения с противоположными направлениями:

$$U_{ab} = -U_{11} + U_1 - U_{10} = U_1 - (U_{11} + U_{10}),$$

$$U_{cd} = U_2 + U_{20}.$$

Заменяя напряжения на пассивных элементах падениями напряжения на них, а напряжения источников - их ЭДС, получим

$$U_{ab} = E_1 - (R_{11} + R_{10}) \cdot I_1, \quad (2.16)$$

$$U_{cd} = E_2 + R_{20} \cdot I_2. \quad (2.17)$$

Из уравнения (2.16) следует, что действительное направление напряжения участка совпадает с условно выбранным $U_{ab} > 0$ и обозначенным на схеме стрелкой направлением при условии, что

$$(R_{11} + R_{10}) \cdot I_1 < E_1.$$

Это может иметь место, если ток нагрузки I_1 участка меньше тока короткого замыкания $I_{1к} = E_1 / (R_{11} + R_{10})$ этого участка.

Следовательно, **активный участок отдает энергию во внешнюю цепь** в случае, **когда действительные направления его тока и напряжения противоположны**, т. е. при $I_1 < I_{1к}$.

При $I_1 > I_{1к}$ напряжение $U_{ab} < 0$, и его действительное направление совпадает с направлением тока участка, т. е. имеет место режим приемника.

Из уравнения (2.17) видно, что второй участок характеризует режим приемника при $R_{20} \cdot I_2 > 0$ или $I_2 > 0$, т. е. когда $U_{cd} > E_2$.

Таким образом, **активный участок с совпадающими положительными направлениями тока и напряжения находится в режиме приемника в случае, когда подведенное к нему напряжение больше ЭДС участка.**

При $U_{cd} < E_2$ ток $I_2 < 0$, и его действительное направление противоположно указанному на схеме стрелкой. Этот участок характеризует тогда генераторное устройство, отдающее энергию во внешнюю цепь.

Для получения уравнения, связывающего ток с ЭДС, напряжением и сопротивлением активного участка в общем виде, определим токи заданных участков из уравнений (2.16) и (2.17):

$$I_1 = \frac{+E_1 - U_{ab}}{R_{11} + R_{10}},$$

$$I_2 = \frac{-E_2 + U_{cd}}{R_{20}}.$$

На основании этих уравнений можно написать общее уравнение для тока активного участка:

$$I = \frac{\pm E \mp U}{R}. \quad (2.18)$$

Это уравнение выражает **обобщенный закон Ома для активного участка цепи**, согласно которому **ток активного участка цепи равен алгебраической сумме его напряжения и ЭДС, деленной на сопротивление участка.**

ЭДС и напряжения имеют знак "+", если их направления совпадают с направлением тока, и знак "-", когда их направления противоположны направлению тока.

2.4 Работа и мощность постоянного тока

2.4.1 Работа электрического тока. При прохождении электрического тока по проводнику совершается работа по перемещению зарядов. Из курса физики известно, что работа, совершаемая электрическим током на участке цепи, прямо пропорциональна падению напряжения на этом участке, силе тока и времени, в течение которого протекает этот ток:

$$A = U \cdot I \cdot t. \quad (2.19)$$

Единицей измерения работы электрического тока является 1 джоуль или ватт-секунда:

$$1 \text{ Дж} = \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} = \text{Вт} \cdot \text{с}.$$

Из формулы (2.19), используя различные формы записи закона Ома, путем несложных преобразований можно получить следующие соотношения:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (2.20)$$

$$A = \frac{U^2 \cdot t}{R}. \quad (2.21)$$

В зависимости от типа потребителя процесс совершения работы электрическим током сопровождается превращением электрической энергии в тепловую (в нагревательных приборах), в механическую (в электродвигателях) или световую (в осветительных устройствах).

2.4.2 Мощность электрического тока. Мощностью называется величина, характеризующая скорость, с которой совершается работа, т. е. скорость преобразования энергии. *Электрическая мощность (P) – это работа, совершаемая электрическим током в единицу времени.*

$$P = \frac{A}{t}. \quad (2.22)$$

Из выражения (2.22) можем записать

$$P = U \cdot I, \quad (2.23)$$

т. е. мощность, развиваемая на участке цепи электрическим током, прямо пропорциональна напряжению и силе тока на этом участке.

Единицей измерения мощности является **Ватт**: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$.

Из соотношения (2.23) путем несложных преобразований могут быть получены следующие формулы для расчета мощности:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (2.24)$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (2.25)$$

Мощность, развиваемая источником электрической энергии во всей цепи, называется **полной мощностью**. Полная мощность (P_{Π}) определяется электродвижущей силой источника и величиной тока нагрузки (рис. 2.1):

$$P_{\Pi} = E \cdot I_{\text{H}}. \quad (2.26)$$

Так как ЭДС источника равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи (см. рис. 2.1), можем записать

$$P_{\Pi} = (U + U_0) I_{\text{H}} = U \cdot I_{\text{H}} + U_0 \cdot I_{\text{H}}. \quad (2.27)$$

Величина $U \cdot I_{\text{H}}$ выражает мощность, поглощаемую внешним участком цепи, т. е. мощность, потребляемую нагрузкой. Она называется **полезной мощностью** или мощностью нагрузки:

$$P_{\text{H}} = U \cdot I_{\text{H}}. \quad (2.28)$$

Величина $U_0 \cdot I$ выражает мощность, расходуемую внутри источника, она называется **мощностью потерь**:

$$P_{\text{пот}} = U_0 \cdot I_{\text{H}}. \quad (2.29)$$

В практических расчетах в схеме замещения часто учитывают и сопротивление линии $R_{\text{л}}$. В этом случае мощность потерь определяется выражением:

$$P_{\text{пот}} = U_0 \cdot I_{\text{H}} + U_{\text{л}} \cdot I_{\text{H}} = I_{\text{H}}^2 \cdot (R_0 + R_{\text{л}}). \quad (2.30)$$

Таким образом, полная мощность равна сумме полезной мощности и мощности потерь:

$$P_{\Pi} = P_H + P_{\text{пот.}} \quad (2.31)$$

2.4.3 Коэффициент полезного действия. В связи с тем, что не вся мощность источника потребляется приемником электрической энергии, вводят понятие *коэффициента полезного действия* источника η , определяемое отношением полезной мощности к его полной мощности:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}}, \text{ или в процентах } \eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} 100\%. \quad (2.32)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) может быть выражен и через другие величины, характеризующие электрическую цепь (см. рис. 2.1):

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} = \frac{U \cdot I_H}{E \cdot I_H} = \frac{U}{E}, \quad (2.33)$$

или
$$\eta = \frac{P_H}{P_H + P_0} = \frac{I_H^2 \cdot R_H}{I_H^2 \cdot R_H + I_H^2 \cdot R_0} = \frac{R_H}{R_H + R_0}, \quad (2.34)$$

или
$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{E - U_0}{E} = 1 - \frac{U_0}{E} = 1 - \frac{I_H \cdot R_0}{I_{K3} \cdot R_0} = 1 - \frac{I_H}{I_{K3}}. \quad (2.35)$$

На рисунке 2.4 показан график зависимости КПД источника от тока нагрузки. При холостом ходе ток равен нулю, и КПД источника равен 1. При коротком замыкании ток достигает максимального значения, но КПД при этом обращается в нуль, поскольку никакой полезной работы источник не совершает и вся энергия расходуется внутри источника.

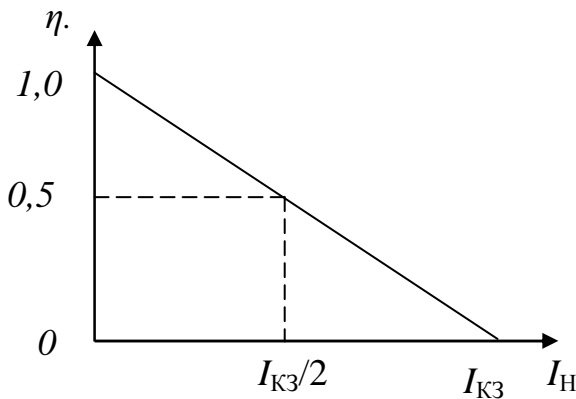


Рисунок 2.4 – Зависимость $\eta = f(I_H)$

Равенство КПД единице при холостом ходе следует понимать так, что при приближении режима работы источника к режиму холостого хода его КПД стремится к единице. Это происходит, когда сопротивление нагрузки многократно превышает внутреннее сопротивление источника. Потери энергии внутри источника в этом случае значительно меньше полезной мощности. Из графика видно, что при соблюдении условия получения максимальной полезной мощности от источника при $I_H = I_{K3}/2$ его КПД составляет всего 0,5.

Электрические генераторы силовых установок рассчитывают на работу в режимах, обеспечивающих максимально высокий КПД. У современных генераторов он достигает 98 – 99%.

2.4.4 Тепловое действие тока. Электрический ток, протекая по проводнику, нагревает его, так как в проводнике происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Физическая сущность этого явления заключается в том, что упорядоченно движущиеся носители зарядов, сталкиваясь с атомами вещества, отдают им часть своей энергии, за счет чего тепловое движение последних становится более интенсивным. В металлах, например, «свободные» электроны соударяются с ионами кристаллической решетки и отдают им часть своей кинетической энергии, отчего колебательное движение ионов усиливается и, как следствие, растет температура проводника.

Если при прохождении электрического тока по проводнику не происходит дополнительных преобразований электрической энергии в химическую, механическую или световую, то вся энергии, идущая на перемещение электрических зарядов, превращается в тепловую энергию. При этом выделяется количество тепла Q , эквивалентное работе электрического тока:

$$Q = A = U \cdot I \cdot t \text{ или } Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.36)$$

Количество тепла здесь выражается в джоулях.

В технических расчетах часто измеряют тепловую энергию в калориях (1 калория - это количество тепла, необходимое для нагревания 1 грамма воды на 1 градус Цельсия). Один джоуль составляет 0,24 калории, поэтому величину 0,24 калории/джоуль называют **термическим эквивалентом работы**.

Количество тепла, выраженное в калориях, которое выделяется в проводнике при прохождении по нему электрического тока, чаще всего выражается следующим образом:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.37)$$

Это соотношение впервые было получено опытным путем независимо друг от друга английским ученым Д. П. Джоулем (1841 г.) и русским ученым Э. Х. Ленцем (1842 г.) и называется **законом Джоуля-Ленца**.

Количество тепла, выделенное электрическим током в проводнике, прямо пропорционально квадрату силы тока, величине сопротивления проводника и времени, в течение которого проходит ток. Кроме формулы (2.37) закон Джоуля-Ленца может быть выражен следующими формулами:

$$Q = 0,24 \cdot U \cdot I \cdot t, \text{ или } Q = 0,24 \frac{U^2}{R} t. \quad (2.38)$$

Поскольку в системе СИ тепловая энергия измеряется в джоулях, то закон Джоуля-Ленца записывается в виде:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (2.39)$$

2.5 Условия отдачи источником максимальной мощности

При сопротивлении внешней цепи (см. рис. 2.1), равном R_H , напряжение и ток в нем связаны уравнением $U = I_H \cdot R_H$, выражающим закон Ома для пассивного участка цепи. Учитывая это, можно записать:

$$E = U_0 + U = I_H \cdot R_0 + I_H \cdot R_H. \quad (2.40)$$

Это уравнение выражает электрическое равновесие простейшей замкнутой цепи. Из (2.40) можем получить:

$$I_H = E / (R_0 + R_H). \quad (2.41)$$

При этом мощность источника питания

$$P_{\Pi} = I_H^2 \cdot (R_0 + R_H) = E^2 / (R_0 + R_H), \quad (2.42)$$

и мощность, выделяемая на нагрузке

$$P_H = R_H \cdot I_H^2 = R_H \cdot E^2 / (R_0 + R_H)^2. \quad (2.43)$$

Мощность нагрузки P_H при холостом ходе ($R_H = \infty$) и при коротком замыкании ($R_H = 0$) равна нулю. Она имеет максимальное значение, когда отношение $R_H / (R_0 + R_H)^2$ максимально. Взяв первую производную этой дроби по R_H и приравняв ее нулю, получим

$$\frac{d}{dR_H} \cdot \frac{R_H}{(R_0 + R_H)^2} = \frac{(R_0 + R_H)^2 - 2R_0(R_0 + R_H)}{(R_0 + R_H)^2} = 0,$$

или $(R_0 + R_H)^2 - 2R_0(R_0 + R_H) = 0,$

откуда $R_H = R_0. \quad (2.44)$

Следовательно, **мощность внешней цепи максимальна, когда сопротивление внешней цепи R_H равно внутреннему сопротивлению R_0 источника**, т. е. когда внешняя цепь и источник работают в согласованном режиме.

В согласованном режиме мощность потерь внутри источника равна половине мощности источника:

$$\Delta P_{\text{ист}} = R_0 \cdot I^2 = R_H \cdot I^2 = E \cdot I / 2. \quad (2.45)$$

Исследуем изменение КПД источника в зависимости от величины сопротивления R_H . **КПД источника равен отношению мощности внешней цепи P_H к полной мощности P_{Π} источника:**

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} = \frac{R_H \cdot I^2}{(R_0 + R_H) \cdot I^2} = \frac{R_H}{(R_0 + R_H)} = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_H}}. \quad (2.46)$$

Из формулы (2.46) видно, что при холостом ходе, когда $R_H = \infty$, КПД $\eta_{\text{хх}} = 1$; при коротком замыкании, когда $R_H = 0$, КПД $\eta_{\text{кз}} = 0$; в согласованном режиме ($R_H = R_0$) КПД $\eta_{\text{согл}} = 0,5$.

На рисунке 2.5 показаны графики зависимостей мощностей P_{Π} , P_{H} и КПД η от соотношения сопротивлений внешней цепи и источника R_{H}/R_0 .

Отметим, что в практических условиях номинальный режим мощных источников редко совпадает с согласованным режимом, так как КПД при этом равен 0,5, и нагрузочный ток источника значительно превышает номинальное значение. Последнее обстоятельство может привести к чрезмерному выделению тепла внутри источника.

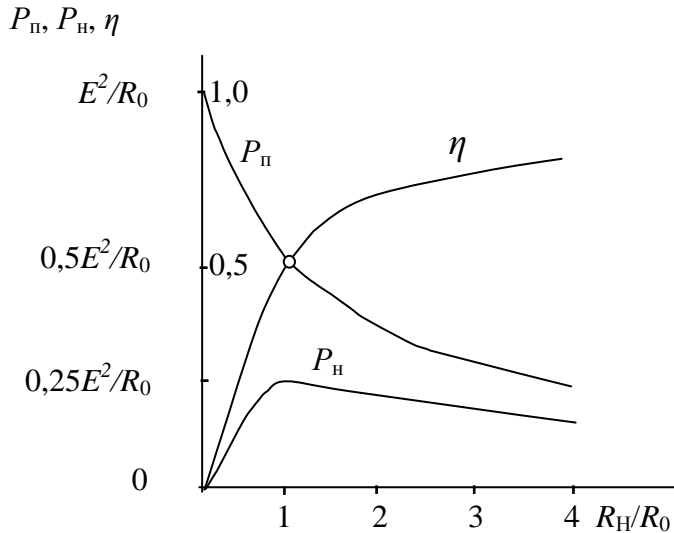


Рисунок 2.5 – График зависимости P_{Π} , P_{H} и η от соотношения R_{H}/R_0

Согласованный режим работы электрической цепи используют, только если низкий КПД не имеет решающего значения. Это имеет место в цепях малой мощности. Работа цепей большой мощности в согласованном режиме из-за низкого КПД оказывается неэкономичной. Для повышения КПД внутреннее сопротивление источника R_0 должно быть мало по сравнению с сопротивлением внешней цепи R_{H} . Это приближает режим источника к режиму холостого хода, и КПД источника приближается к единице.

2.6 Схемы соединения элементов цепи

Возможные варианты соединения элементов цепей постоянного тока рассмотрим на примере соединения пассивных электроприемников.

2.6.1 Последовательное соединение элементов цепи. *Последовательным называют такое соединение, при котором в каждом из элементов протекает один и тот же ток.* При последовательном соединении n элементов токи исходной (рис. 2.6, а) и эквивалентной (рис. 2.6, б) схем одинаковы. Поэтому для них в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать уравнение

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = U,$$

или

$$R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I = R_{\text{ЭКВ}} I,$$

и определить из него эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (2.47)$$

Эквивалентное сопротивление последовательно соединенных элементов цепи равно сумме сопротивлений отдельных элементов. Для анализа режимов работы схемы запишем следующие уравнения цепи:

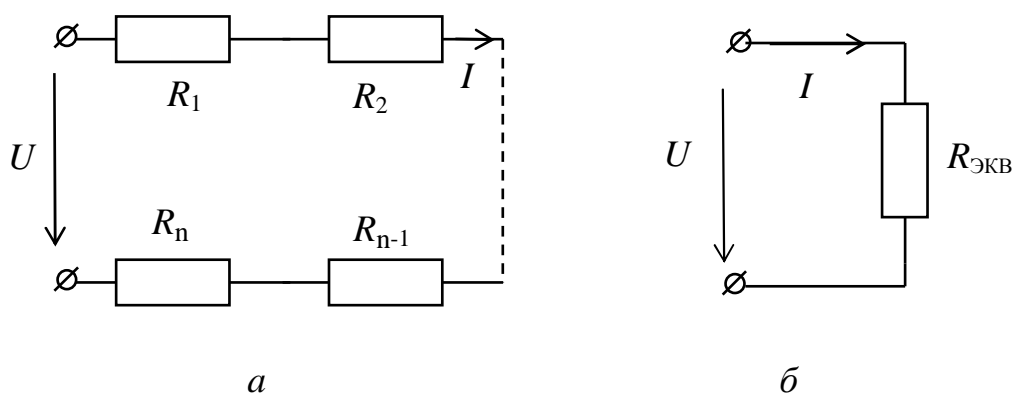


Рисунок 2.6 – Схема цепи с последовательным соединением активных сопротивлений (а) и ее эквивалентное сопротивление (б)

для тока

$$I = U/R_{\text{экв}}; \quad (2.48)$$

для падения напряжения на n -м элементе

$$U_n = R_n \cdot U/R_{\text{экв}}; \quad (2.49)$$

для мощности, рассеиваемой на n -м элементе

$$P_n = R_n \cdot I^2 = R_n \cdot U^2/R_{\text{экв}}^2. \quad (2.50)$$

На основании этих уравнений можно получить некоторые **общие свойства последовательной цепи**:

1. Из уравнений (2.48) и (2.49) видно, что между напряжением на входе схемы, током и падением напряжения на ее отдельных элементах имеется пропорциональная зависимость. Всякое изменение напряжения U в k раз влечет за собой изменение тока и падения напряжения на каждом элементе также в k раз. Мощность всей цепи и в ее отдельных элементах изменяется при этом в k^2 раз.

2. Ток в цепи и падения напряжения на ее отдельных элементах зависят от величины сопротивлений каждого из элементов цепи. При этом если сопротивление какого-либо элемента увеличить, ток в цепи и падения напряжения на элементах с неизменными сопротивлениями уменьшатся, а падение напряжения на элементе с возросшим сопротивлением возрастет. В пределе, если сопротивление этого элемента увеличить до бесконечности (холостой ход), напряжение на зажимах этого элемента будет равно напряжению источника.

Полная взаимозависимость режимов работы последовательно соединенных элементов является характерным признаком этого соединения.

Последовательное соединение приемников используют в том случае, когда их номинальные напряжения ниже напряжения сети. Если, например, приемники имеют номинальные напряжения 110 В, а напряжение сети 220 В, то эти приемники можно соединить последовательно и включить под напряжение сети. Однако при этом следует иметь в виду, что *сопротивление приемника обратно пропорционально его номинальной*

*мощности: $R = U^2/P_n$. Поэтому приемник большей номинальной мощности будет работать с недогрузкой, а приемник меньшей номинальной мощности - с перегрузкой. **Последовательно соединенные приемники с одинаковыми номинальными напряжениями будут иметь наилучшие условия работы при одинаковых номинальных мощностях.***

Многочисленны применения последовательных соединений элементов в различных областях техники. При использовании, например, двигателей постоянного тока последовательно с цепью якоря включают резисторы с регулируемыми сопротивлениями для ограничения пускового тока (пусковой реостат, см. раздел 10.9) и для регулирования скорости (регулирующий реостат, см. разделы 10.9, 15.2.2).

В практике электрических измерений из последовательно соединенных резисторов образуют измерительные магазины сопротивлений, последовательным включением добавочных резисторов к измерителю напряжения добиваются расширения пределов измерения напряжения и т. п.

2.6.2 Параллельное соединение элементов цепи. На рисунке 2.7, *а* показана схема с n пассивными ветвями, присоединенными к одним и тем же узлам a и b , разность потенциалов между которыми равна напряжению U источника. Поэтому ток в каждой n -й ветви определяется напряжением между узлами и сопротивлением R_n ветви или ее проводимостью $G_n = 1/R_n$:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = G_1 U \\ &\dots\dots\dots \\ I_n &= \frac{U}{R_n} = G_n U \end{aligned} \right\}. \quad (2.51)$$

То обстоятельство, что **параллельное соединение обеспечивает одинаковое напряжение на всех включенных приемниках и их независимые друг от друга режимы работы**, является важным **преимуществом** параллельного соединения, благодаря которому оно нашло широкое применение. Как правило, все приемники электрической энергии включают в сеть параллельно.

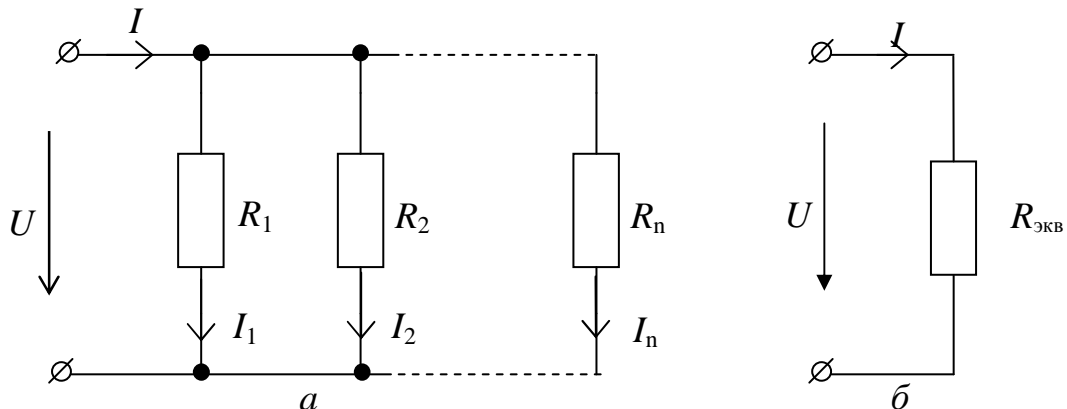


Рисунок 2.7 – Схема цепи с параллельным соединением резистивных элементов (*а*) и ее эквивалентная схема (*б*)

Для характеристики работы параллельной цепи определим ее эквивалентное сопротивление. Условия эквивалентности будут соблюдены, если проходящий по эквивалентной цепи ток $I_{\text{экв}}$ (рис. 2.7, б) будет равен току I в неразветвленной части цепи или сумме токов отдельных параллельных ветвей:

$$I_{\text{экв}} = I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (2.52)$$

Подставляя в это уравнение значения токов из (2.51), получим выражение

$$G_{\text{экв}} \cdot U = G_1 \cdot U + G_2 \cdot U + \dots + G_n \cdot U,$$

из которого можно вывести формулу эквивалентной проводимости

$$G_{\text{экв}} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum G_k, \quad (2.53)$$

или формулу эквивалентного сопротивления

$$1/R_{\text{экв}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n = \sum 1/R_k. \quad (2.54)$$

Следовательно, **при параллельном соединении эквивалентная проводимость цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей**. Так как наибольшей проводимостью обладает ветвь с наименьшим сопротивлением, то проводимость цепи с параллельным соединением элементов не может быть меньше проводимости ветви с наименьшим сопротивлением. **Эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из параллельно соединенных ветвей, обратно пропорционально ее эквивалентной проводимости**

$$R_{\text{экв}} = 1/G_{\text{экв}}, \quad (2.55)$$

поэтому оно всегда меньше наименьшего из сопротивлений ветви.

Следует ясно представлять, что при подключении нового приемника к сети образуется дополнительная параллельная ветвь, общая проводимость цепи при этом увеличивается, а ее эквивалентное сопротивление уменьшается. Если параллельно соединены n ветвей с одинаковыми сопротивлениями R , то их эквивалентное сопротивление будет в n раз меньше сопротивления каждой ветви: $R_{\text{экв}} = R/n$. Уменьшение общего сопротивления цепи будет сопровождаться увеличением тока и мощности:

$$P = U \cdot I = U \cdot (I_1 + I_2 + \dots + I_n),$$

или

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$$

Мощность цепи, состоящей из параллельных ветвей, равна сумме мощностей ее отдельных ветвей.

Практический интерес представляет цепь с двумя параллельно включенными резисторами, имеющими сопротивления R_1 и R_2 . Эквивалентное сопротивление такой цепи равно произведению сопротивлений, деленному на их сумму:

$$R_{\text{экв}} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2.56)$$

Токи в ветвях этой цепи соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = R_{\text{экв}} \frac{I}{R_1} = R_2 \frac{I}{R_1 + R_2} \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = R_{\text{экв}} \frac{I}{R_2} = R_1 \frac{I}{R_1 + R_2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.57)$$

Согласно полученным соотношениям ток в каждой из двух параллельных ветвей цепи равен току неразветвленного участка цепи, умноженному на отношение сопротивления противоположной ветви к сумме сопротивлений двух ветвей.

2.6.3 Смешанное соединение элементов цепи. Смешанным соединением элементов называют сочетание их последовательных и параллельных соединений. Наиболее простым и распространенным в практике смешанным соединением является цепь обычного параллельного подключения приемников к распределительному щитку при подсоединении этого щитка к источнику питания с помощью проводов.

Схемы смешанного соединения различных электротехнических устройств весьма разнообразны. В качестве примера рассмотрим схему на рисунке 2.8, а.

Пусть все сопротивления резистивных элементов ветвей и напряжение на входе этой схемы заданы и требуется определить токи ее отдельных участков. Для расчета воспользуемся *методом эквивалентных преобразований*, в соответствии с которым *отдельные участки схемы с параллельно или последовательно соединенными элементами заменяют одним эквивалентным элементом*. Постепенным преобразованием участков схему упрощают и приводят к простейшей схеме, состоящей из одного эквивалентного элемента.

Так, ветви с сопротивлениями R_4 и R_5 , схемы (рис. 2.8, а) соединены параллельно, и их можно заменить одной эквивалентной ветвью с сопротивлением

$$R_{43} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}. \quad (2.58)$$

После этого схема несколько упрощается и приобретает вид схемы (рис. 2.8, б), элементы которой с сопротивлениями R_3 и R_{43} соединены последовательно. В свою очередь ветвь 1-4-3-2 соединена параллельно с ветвью R_2 , поэтому эквивалентное сопротивление обеих ветвей участка 1-2

$$R_{12} = \frac{R_2 (R_3 + R_{43})}{R_2 + R_3 + R_{43}}. \quad (2.59)$$

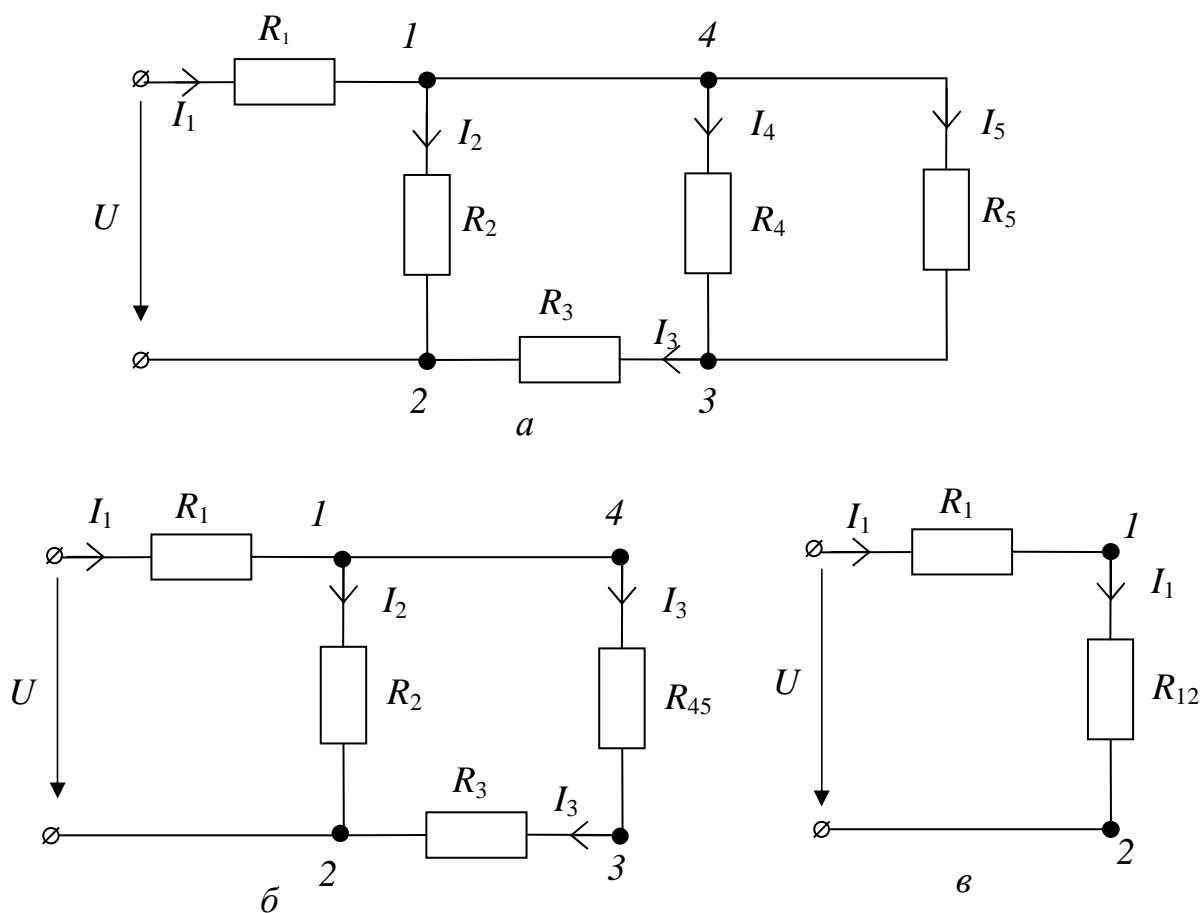


Рисунок 2.8 – Схема цепи со смешанным соединением резистивных элементов (а) и эквивалентные ей схемы (б) и (в)

Резистивный элемент с сопротивлением R_{12} соединен последовательно с резистивным элементом с сопротивлением R_1 , как указано на схеме (рис. 2.8, в). Общее, или входное, сопротивление этой схемы $R_{\text{вх}} = R_{12} + R_1$ дает возможность определить общий ток исходной схемы (рис. 2.8, а):

$$I_1 = U/R_{\text{вх}}. \quad (2.60)$$

Затем, возвращаясь к схеме на рисунке 2.8, в, можно определить напряжение на участке 1-2:

$$U_{12} = R_{12} \cdot I_1,$$

и токи в резисторах R_2 и R_3 схемы на рисунке 2.8, б:

$$I_2 = U_{12}/R_2 \text{ и } I_3 = U_{12}/(R_{43} + R_3). \quad (2.61)$$

Ток I_3 проходит также по эквивалентному элементу с сопротивлением R_{43} , падение напряжения на котором равно напряжению на участке 4-3 исходной схемы (рис. 2.8, а):

$$I_3 = \frac{U_{12}}{R_{43} + R_3} \text{ и } U_{43} = I_3 \cdot R_{43}.$$

Зная напряжение U_{43} , можно найти токи остальных ветвей:

$$I_4 = U_{43}/R_4 \text{ и } I_5 = U_{43}/R_5. \quad (2.62)$$

Рассмотренный выше порядок расчета схемы со смешанным соединением пассивных элементов называется **методом эквивалентного преобразования**. Суть данного метода, как видно из приведенного выше примера, сводится к последовательному упрощению схемы соединения пассивных элементов путем замены участков с последовательным или параллельным соединением элементов их эквивалентными схемами, получаемыми из уравнений (2.45) для участков с последовательным или уравнений (2.53 и 2.54) для участков с параллельным соединением элементов.

2.6.4 Эквивалентные преобразования соединений пассивных элементов звездой и треугольником. Встречаются схемы со сложным соединением элементов, которые нельзя отнести ни к параллельному, ни к последовательному соединению. Рассмотрим одну из таких схем, когда часть ее образует треугольник. Вершинами треугольника являются три узла, а сторонами - три пассивных ветви, включенные между этими узлами. Для упрощения расчета подобных схем во многих случаях бывает удобно заменить треугольник эквивалентной трехлучевой звездой.

Рассмотрим схему с двумя треугольниками резисторов 1-2-3 и 4-5-6 (рис. 2.9) и ее преобразование в схему с эквивалентными звездами (рис. 2.10) с сопротивлениями резисторов лучей R_1, R_2, R_3 и R_4, R_5, R_6 . Такое преобразование схемы соединения элементов в треугольник в схему соединения элементов звездой дает возможность упростить расчет схемы.

Определим уравнения, связывающие эквивалентные сопротивления треугольника и звезды (рис. 2.11, а и б).

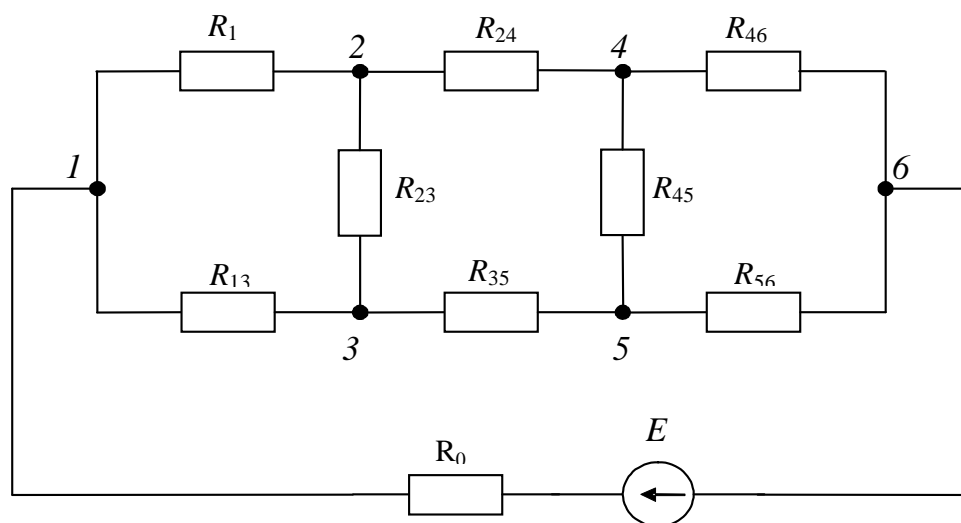


Рисунок 2.9 – Схема сети с двумя участками соединения сопротивлений треугольником

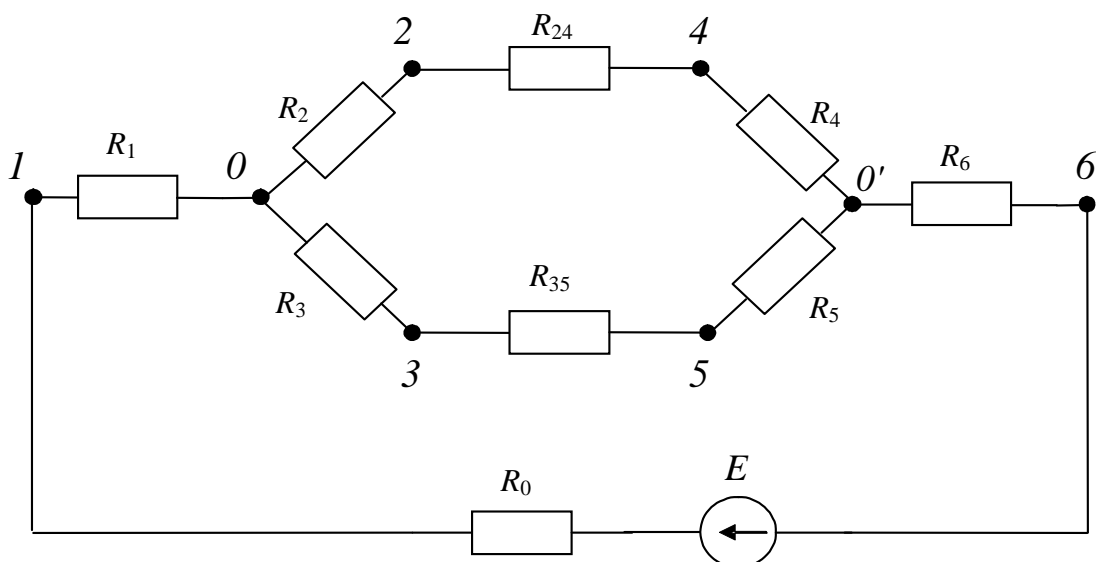


Рисунок 2.10 – Эквивалентная схема с двумя участками соединения сопротивлений звездой

Для решения задачи воспользуемся общим условием эквивалентности, в соответствии с которым токи в ветвях схемы, не подвергнутых преобразованию, должны остаться без изменения. Это означает, что токи, направленные к узлам 1, 2 и 3 по проводам схем треугольника (рис. 2.9) и звезды (рис. 2.10), должны быть одинаковыми. Условие эквивалентности должно быть соблюдено во всех режимах, включая режим обрыва одного из проводов, присоединенных к узлам 1, 2 и 3.

При обрыве провода, присоединенного к узлу 1, напряжение между узлами 2 и 3, а также токи проводов, присоединенных к этим узлам, должны быть одинаковыми в схемах треугольника и звезды. Следовательно, сопротивления между узлами 2 и 3 схем треугольника и звезды должны быть равны между собой. В схеме звезды (рис. 2.10) ток по резистору R_1 не проходит. Поэтому между узлами 2 и 3 будет включен участок, состоящий из последовательно соединенных двух лучей звезды, общее сопротивление которых равно $R_2 + R_3$.

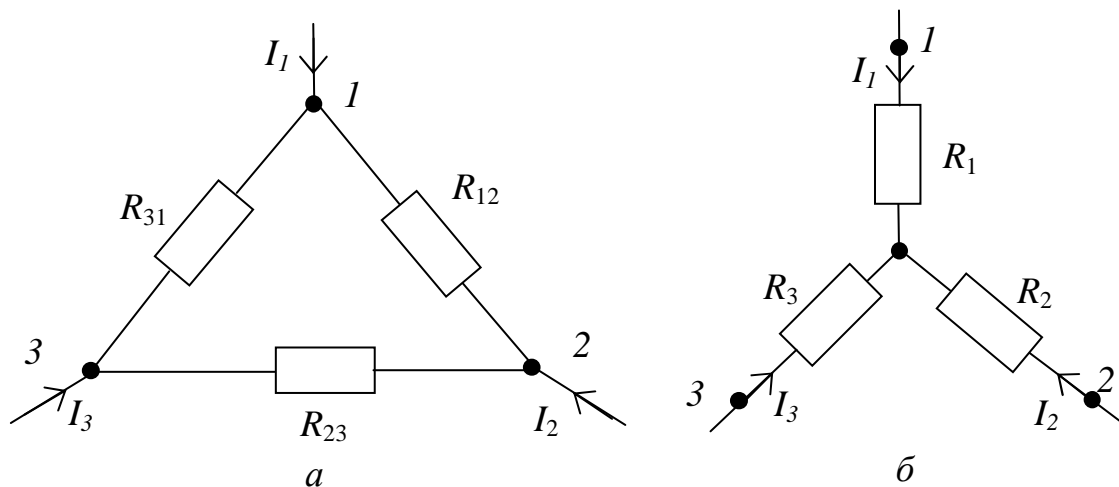


Рисунок 2.11 – Эквивалентные соединения резисторов треугольником (а) и звездой (б)

В схеме треугольника между узлами 2 и 3 имеются две параллельные ветви, в одну из которых включен резистор с сопротивлением R_{23} , а в другую – два последовательно соединенных резистора с сопротивлениями R_{31} и R_{12} . Общее сопротивление этой цепи

$$\frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}.$$

По условию эквивалентности

$$R_2 + R_3 = \frac{R_{23}(R_{31} + R_{12})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}. \quad (2.63)$$

Повторяя вышеприведенные рассуждения для случая, когда обрывается провод, присоединенный к узлу 2, а затем к узлу 3, получим еще два уравнения:

$$R_3 + R_1 = \frac{R_{31}(R_{12} + R_{23})}{R_{23} + R_{31} + R_{23}}; \quad (2.64)$$

$$R_1 + R_2 = \frac{R_{12}(R_{23} + R_{31})}{R_{23} + R_{31} + R_{12}}. \quad (2.65)$$

Решая полученную систему из трех уравнений (2.63) – (2.65) относительно сопротивлений звезды, находим:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad (2.66)$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad (2.67)$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (2.68)$$

Следовательно, *сопротивление луча эквивалентной звезды равно произведению сопротивлений сторон треугольника, прилегающих к лучу, деленному на сумму сопротивлений всех сторон треугольника.*

В случае равенства сопротивлений сторон треугольника $R_{12} = R_{23} = R_{31} = R_{\Delta}$ сопротивления лучей эквивалентной звезды $R_1 = R_2 = R_3 = R_Y$ будут в три раза меньше сопротивлений сторон треугольника: $R_Y = R_{\Delta}/3$.

При замене трехлучевой звезды эквивалентным треугольником сопротивления сторон треугольника R_{12} , R_{23} , R_{31} можно определить по известным сопротивлениям лучей звезды R_1 , R_2 , R_3 , решая систему уравнений (2.66), (2.67) и (2.68) относительно R_{12} , R_{23} , R_{31} . Для этого перемножим попарно (2.66) на (2.67), (2.67) на (2.68), (2.68) на (2.66), сложим эти произведения и проведем соответствующие преобразования. В результате получим

$$R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}.$$

Разделив полученное уравнение поочередно на (2.68), (2.67) и (2.66), найдем формулы перехода в окончательном виде:

$$\left. \begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.69)$$

Из полученных формул видно, что *сопротивление любой стороны эквивалентного треугольника равно сумме сопротивлений лучей звезды, примыкающих к этой стороне треугольника, и дроби, числитель которой равен произведению сопротивлений этих лучей, а знаменатель - сопротивлению третьего луча звезды.*

2.7 Законы Кирхгофа

В теории электрических цепей большое значение имеют экспериментально установленные в 1845 г. немецким физиком Г. Р. Кирхгофом законы, получившие название 1-го и 2-го законов Кирхгофа.

2.7.1 Первый закон Кирхгофа. Этот закон относится к узлам цепи и для случая постоянных токов формулируется следующим образом: *алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.70)$$

При записи уравнений в соответствии с первым законом Кирхгофа суммирование токов производится алгебраически. Токам, направленным к узлу, присваивается один знак, например «+», а токам, направленным от узла, - противоположный знак «-». Поэтому часто встречается другая формулировка первого закона Кирхгофа: *сумма токов, притекающих к узлу, равна сумме токов, исходящих из него.*

Если к узлу подключены несколько источников тока, то сумма генерируемых ими токов $\sum I_{\Gamma}$ должна с соответствующими знаками присутствовать в левой части уравнения (2.70).

Первый закон Кирхгофа является следствием *закона сохранения количества электричества* [23], согласно которому ни в какой точке заряды не могут безгранично накапливаться: *количество электричества, притекающее к данной точке за определенный промежуток времени, должно быть равно количеству электричества, оттекающему от нее за то же время.*

Примем для схемы на рисунке 2.12 токи, входящие в узел d , положительными (I_Γ и I_1), а токи, исходящие из узла, – отрицательными (I_2 и I_3). Тогда можем записать следующее уравнение по первому закону Кирхгофа

$$I_\Gamma + I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad (2.71)$$

что будет соответствовать 1-й формулировке первого закона Кирхгофа, или в виде

$$I_\Gamma + I_1 = I_2 + I_3, \quad (2.72)$$

что соответствует 2-й формулировке первого закона Кирхгофа, или легко получается путем преобразования соотношения (2.71).

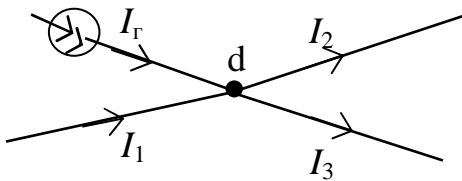


Рисунок 2.12 - Схема участка сети

2.7.2 Второй закон Кирхгофа. Этот закон является следствием закона сохранения энергии, в силу которого изменение потенциала в замкнутом контуре равно нулю. Изменение потенциала между парой узлов участка характеризуется разностью потенциалов или равным ему напряжением.

При обходе замкнутого контура по отдельным участкам потенциал конечного узла m этого участка повышается относительно потенциала его начального узла n на величину напряжения, если направление обхода противоположно направлению стрелки напряжения, и понижается, когда направление обхода и направление стрелки напряжения совпадают. Поэтому изменения потенциала в замкнутом контуре можно определить суммированием напряжений с учетом их знаков. Согласно **второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений участков замкнутого контура равна нулю** (первая формулировка):

$$\Sigma U_{mn} = 0. \quad (2.73)$$

При этом условились напряжениям, положительные направления которых совпадают с направлением обхода контура, присваивать положительные знаки, а напряжениям, положительные направления которых противоположны направлению обхода – отрицательные знаки.

Применительно к схемам замещения с источниками ЭДС **второй закон Кирхгофа** формулируется следующим образом: **алгебраическая сумма напряжений на элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур** (вторая формулировка)

$$\Sigma I \cdot R = \Sigma E. \quad (2.74)$$

2.7.3 Порядок анализа цепей. Применение первого и второго законов Кирхгофа для анализа электрических цепей позволяет выполнить расчет практически любой цепи. Как правило, при исследовании известны ЭДС и сопротивления всех элементов схемы, и нужно определить значения токов и мощностей в ветвях схемы. Порядок расчета рассмотрим на примере схемы цепи, показанной на рисунке 2.13.

Алгоритм расчета:

1. На исходной схеме произвольным образом наносим направления токов в ветвях (на рис. 2.13, б токи I_1 , I_2 и I_3). Если в ветви есть ЭДС, то направление тока лучше задать совпадающим с направлением этой ЭДС. Наносим обозначения узлов (узлы 1 и 2 на рис. 2.13, б).

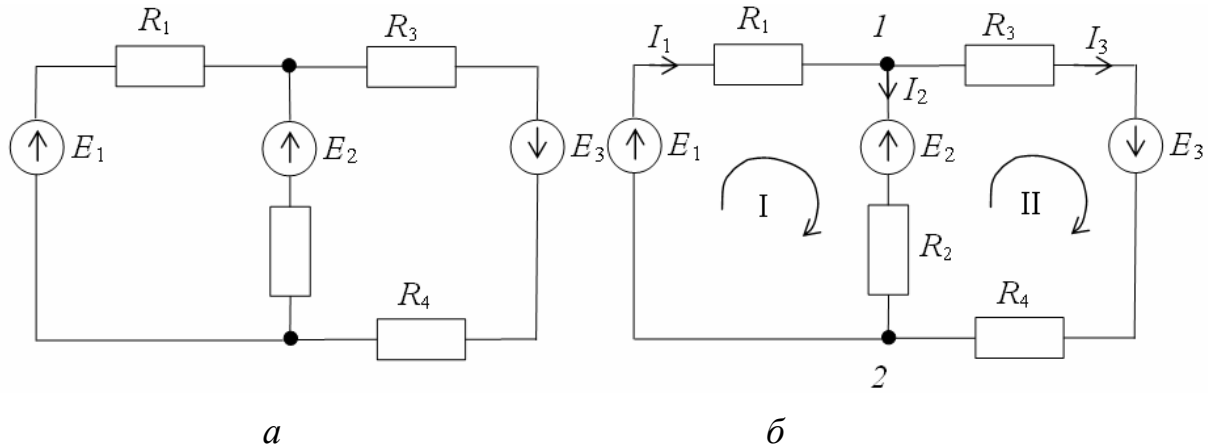


Рисунок 2.13 - Схема электрической цепи: а – исходная; б – с нанесенными обозначениями узлов, токов и направлений обхода контуров

2. Определяем **число узлов n , ветвей t и независимых контуров k** .

Независимым называют контур, в который входит хотя бы одна новая ветвь. Количество независимых контуров равно $k = t - (n - 1)$.

3. Для независимых контуров произвольным образом задаемся направлением обхода (на рис. 2.13, б контура I и II, направление обхода - по часовой стрелке).

Для определения неизвестных токов в ветвях необходимо составить систему линейных алгебраических уравнений, количество которых равно количеству неизвестных токов. По первому закону Кирхгофа можно составить $n-1$ независимых уравнений. Использовать все n уравнений невозможно, так как одно из них обязательно будет зависимым. Это связано с тем, что токи ветвей войдут в уравнения, составленные для всех n узлов, дважды, причем с разными знаками, поскольку один и тот же ток направлен от одного узла (имеет знак минус в уравнении) к другому узлу (имеет знак плюс). При сложении всех уравнений левая и правая части будут равны нулю, а это означает, что одно из уравнений можно получить суммированием $n-1$ уравнений и заменой знаков всех токов на противоположные. Таким образом, n -е уравнение всегда будет зависимым и поэтому использовать его для определения токов нельзя.

4. Устанавливаем число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа и записываем эти уравнения.

5. Недостающие уравнения составляем по второму закону Кирхгофа. Количество уравнений, составляемых по второму закону Кирхгофа, должно быть равно количеству независимых контуров k .

6. Решаем полученную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных токов в ветвях.

7. Для проверки правильности расчета полученных значений тока составляем уравнение баланса мощностей источников и приемников электрической энергии

$$\sum E \cdot I = \sum I^2 \cdot R, \quad (2.75)$$

в котором правая часть характеризует мощность пассивных приемников электрической энергии, а левая - мощность активных элементов цепи. При составлении уравнения баланса мощностей следует иметь в виду, что в левой его части со знаком плюс записываются те слагаемые, для которых направления ЭДС и тока совпадают. Если же направления ЭДС и тока противоположны (работа источника в режиме потребления электрической энергии), то соответствующие слагаемые записываются либо со знаком минус в левой части уравнения, либо со знаком плюс в правой его части, что соответствует мощности активного приемника электрической энергии.

Схема электрической цепи (рис. 2.13, *a*), содержит два узла ($n = 2$), три ветви ($m = 3$) и два независимых контура

$$k = m - (n - 1) = 3 - (2 - 1) = 2.$$

По первому закону Кирхгофа для нее можно составить одно независимое уравнение, например, для узла I

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.76)$$

По второму закону Кирхгофа следует составить два уравнения для двух независимых контуров (на схеме рис. 2.13, *б* контура I и II). С учетом принятых направлений обхода контуров, эти уравнения имеют вид:

для контура I

$$R_1 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 = E_1 - E_2; \quad (2.77)$$

для контура II

$$-R_2 \cdot I_2 + (R_3 + R_4) \cdot I_3 = E_2 + E_3. \quad (2.78)$$

При составлении уравнений (2.77), (2.78) со знаком плюс записываем те слагаемые, в которых ток и ЭДС имеют направления, совпадающие с направлением обхода контура.

Решая систему уравнений (2.76), (2.77) и (2.78), можно определить неизвестные токи (три уравнения, три неизвестных I_1, I_2, I_3). Если в результа-

те решения уравнений получатся отрицательные значения токов, то это означает, что истинные направления этих токов в ветвях цепи противоположны направлениям, принятым на рисунке 2.13, б.

Составляем уравнение баланса мощностей и выполняем проверку решения. Для нашего случая (рис. 2.13, б) уравнение баланса мощностей имеет вид

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot (R_2 + R_4).$$

Для инженерных расчетов относительная погрешность полученного решения составляет $\delta = 2\text{--}5\%$, что для большинства случаев считается удовлетворительным.

Выводы

1. В соответствии с законом Ома ток на участке цепи прямо пропорционален приложенному напряжению и обратно пропорционален сопротивлению участка цепи.

2. Чем больше разность потенциалов на зажимах участка цепи, тем больше сила тока при неизменной величине сопротивления цепи.

3. Полное сопротивление цепи представляет собой сумму сопротивлений нагрузки и внутреннего сопротивления источника питания.

4. Под режимом холостого хода понимают работу источника электрической энергии при отключенной нагрузке.

5. Режим короткого замыкания источника имеет место, когда величина сопротивления нагрузки практически равна нулю.

6. Номинальный режим источника характеризуется тем, что напряжение, ток и мощность в этом режиме соответствуют значениям, на которые источник рассчитан заводом-изготовителем.

7. Для повышения стабильности напряжения на потребителе следует понижать внутреннее сопротивление источника.

8. Для получения высокого КПД источника электрической энергии сопротивление потребителя должно многократно превышать внутреннее сопротивление источника.

9. Мощность внешней цепи максимальна, когда сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника.

10. Последовательно соединенные приемники с одинаковыми номинальными напряжениями имеют наилучшие условия работы при одинаковых номинальных мощностях.

11. Работа, совершаемая электрическим током на участке цепи, прямо пропорциональна падению напряжения на этом участке, силе тока и времени, в течение которого протекает ток.

12. Электрическая мощность – это работа, совершаемая электрическим током в единицу времени.

13. Последовательным называют такое соединение, при котором в каждом из элементов протекает один и тот же ток.

14. Мощность цепи, состоящей из параллельных ветвей, равна сумме мощностей ее отдельных ветвей.

15. Сопротивление какого-либо луча эквивалентной звезды равно произведению сопротивлений сторон треугольника, прилежающих к плечу, деленному на сумму сопротивлений всех сторон треугольника.

16. Сопротивление какой-либо стороны эквивалентного треугольника равно сумме сопротивлений лучей звезды, примыкающих к этой стороне треугольника, и дроби, числитель которой равен произведению сопротивлений этих лучей, а знаменатель – сопротивлению третьего луча звезды.

17. Сумма токов, притекающих к узлу, равна сумме токов, вытекающих из него (первый закон Кирхгофа).

18. Алгебраическая сумма напряжений участков замкнутого контура равна нулю (второй закон Кирхгофа).

19. Число независимых уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для произвольной цепи, равно числу узлов цепи минус 1.

20. Число независимых уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для произвольной цепи, равно числу независимых контуров цепи.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение закона Ома для всей цепи.
2. Сформулируйте закон Ома для полной цепи и для участка электрической цепи.
3. Поясните физический смысл понятия «падение напряжения».
4. Как вычислить величину сопротивления участка цепи?
5. Поясните зависимость напряжения на зажимах источника электрической энергии от нагрузки. Почему при изменении нагрузки напряжение, подводимое к потребителю, изменяется?
6. В каких режимах может работать источник электрической энергии? Охарактеризуйте особенности этих режимов.
7. Чему равно напряжение холостого хода на зажимах источника и почему оно снижается при замыкании цепи нагрузки?
8. Поясните, почему в режиме короткого замыкания напряжение на зажимах источника электрической энергии равно нулю.

9. Что понимают под номинальными параметрами электроприемника? Источника электрической энергии?
10. Как рассчитывается работа и мощность электрического тока?
11. Дайте определение полной мощности, полезной мощности и мощности потерь.
12. Запишите основные соотношения для определения КПД электрической цепи.
13. Объясните закон Джоуля-Ленца.
14. При каком условии источник отдает во внешнюю цепь максимальную мощность? Поясните, почему.
15. Объясните, что представляет собой последовательное соединение элементов цепи, и каковы его общие свойства.
16. Объясните, что представляет собой параллельное соединение элементов цепи, и каковы его общие свойства.
17. Поясните, в чем суть метода эквивалентного преобразования электрических схем?
18. Запишите формулы эквивалентного преобразования звезды в треугольник и треугольника в звезду.
19. Объясните физический смысл первого закона Кирхгофа.
20. Объясните физический смысл второго закона Кирхгофа.
21. Сколько независимых уравнений по первому закону Кирхгофа можно составить для схемы произвольной конфигурации?
22. Сколько независимых уравнений по второму закону Кирхгофа можно составить для схемы произвольной конфигурации?
23. Объясните алгоритм определения неизвестных токов схемы произвольной конфигурации по первому и второму законам Кирхгофа.
24. Какой контур схемы называют независимым?
25. Как определяют направления токов в замкнутом контуре?
26. С какой целью составляют уравнение баланса мощностей?

3 МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые понятия: контурный ток, метод контурных токов, собственное сопротивление контура, принцип суперпозиции, метод наложения, принцип взаимности, метод эквивалентного генератора (активного двух-полюсника), метод узловых напряжений.

Классическим приемом расчета сложных цепей является непосредственное применение закона Ома и законов Кирхгофа. Однако для сложных цепей приходится составлять систему с большим числом уравнений, поэтому для упрощения вычислений применяют другие методы, основанные на законах Ома и Кирхгофа. К ним относятся метод узловых потенциалов, метод контурных токов, метод наложения, эквивалентного генератора и др. Выбор метода расчета сложной схемы зависит от имеющихся исходных данных, структуры исследуемой сети и целей ее исследования.

3.1 Применение законов Кирхгофа для анализа сложных цепей

Для простоты последующего восприятия рассмотрим сначала несложный пример на применение законов Кирхгофа для определения токов в ветвях сложной цепи (рис. 3.1). Пусть известны ЭДС источников электрической энергии E_1 и E_2 и сопротивления ветвей схемы.

Число неизвестных токов равно числу $m = 6$ ветвей схемы. Поэтому для решения задачи необходимо составить систему, состоящую из шести независимых уравнений.

В заданной схеме (рис. 3.1) число узлов $n = 4$. Зададимся произвольным направлением токов отдельных ветвей схемы. Будем считать, что токи, направленные к узлам, имеют знак "плюс", а токи, направленные от узлов - знак "минус". Известно, что число независимых уравнений, которые можно составить в соответствии с первым законом Кирхгофа, равно $n-1$. Выбрав узлы b , c и d как независимые, составим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \text{для узла } b: & I_2 - I_4 - I_5 = 0, \\ \text{для узла } c: & I_4 - I_6 - I_3 = 0, \\ \text{для узла } d: & I_3 - I_1 - I_2 = 0. \end{cases} \quad (3.1)$$

Так как число ветвей m всегда больше числа узлов n , то недостающее число уравнений равно $m - (n - 1)$. Их можно составить, пользуясь вторым законом Кирхгофа. Чтобы каждое из составленных уравнений было независимым от предыдущих, надо в схеме выделить независимые контуры. Начинать следует с выбора простейшего контура, имеющего наименьшее число ветвей. Чтобы каждый следующий контур был независимым от пре-

дыдущего, он должен содержать хотя бы одну ветвь, не вошедшую в рассмотренные до этого контуры.

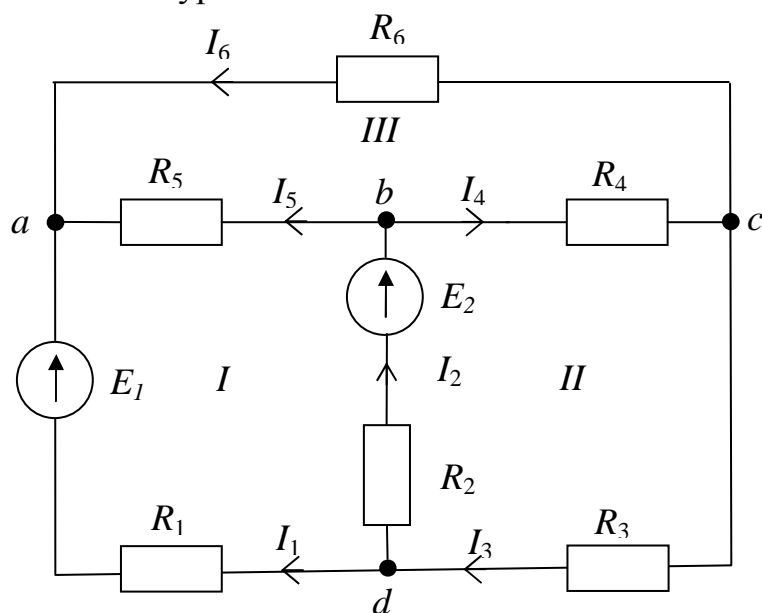


Рисунок 3.1 – Схема сложной цепи для определения токов ветвей по законам Кирхгофа

Выберем три независимых контура *I*, *II* и *III*, как указано на схеме рисунка 3.1, и будем обходить их по направлению движения часовой стрелки. Тогда по второму закону Кирхгофа, получим:

$$\begin{cases} \text{для контура } I: & R_1 I_1 - R_5 I_5 - R_2 I_2 = E_1 - E_2, \\ \text{для контура } II: & R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_3 I_3 = E_2, \\ \text{для контура } III: & R_5 I_5 - R_6 I_6 - R_4 I_4 = 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Уравнения (3.1) и (3.2) составляют систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 0 & +I_2 & +0 & -I_4 & -I_5 & +0 & = & 0 \\ 0 & +0 & -I_3 & +I_4 & +0 & -I_6 & = & 0 \\ -I_1 & -I_2 & +I_3 & +0 & +0 & +0 & = & 0 \\ R_1 I_1 & -R_2 I_2 & +0 & +0 & -R_5 I_5 & +0 & = & E_1 - E_2 \\ 0 & +R_2 I_2 & +R_3 I_3 & +R_4 I_4 & +0 & +0 & = & E_2 \\ 0 & +0 & +0 & -R_4 I_4 & +R_5 I_5 & -R_6 I_6 & = & 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

решение которой дает значения токов в ветвях схемы.

Как было отмечено в п. 2.7.3, если в результате решения системы уравнений токи отдельных участков получатся отрицательными, то это означает, что их действительные направления противоположны заданным перед расчетом системы.

Рассмотрим теперь расчет режима сети в общем случае, когда схема замещения цепи имеет n узлов и m ветвей, из которых m_j ветвей содержат источники тока. При заданных ЭДС источников и известных сопротивлениях ветвей расчет сводится к определению токов в m ветвях.

Систему уравнений для расчета режима схемы составим без учета источников тока, поскольку их наличие упрощает задачу. Как в рассмотренном выше примере, необходимо составить $n - 1$ независимых уравнений по первому закону Кирхгофа и $m - (n - 1)$ независимых уравнений по второму закону Кирхгофа. Полученная система линейных алгебраических уравнений в матричной форме записи имеет вид

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{C}, \quad (3.4)$$

где \mathbf{A} – матрица коэффициентов системы;

\mathbf{I} – матрица-столбец неизвестных токов системы;

\mathbf{C} – матрица-столбец правой части системы.

Для системы уравнений (3.3) матрицы \mathbf{A} , \mathbf{I} и \mathbf{C} имеют следующий вид

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & -R_2 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & R_2 & R_3 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_4 & R_5 & -R_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_1 - E_2 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Систему алгебраических уравнений (3.4) для сложных цепей обычно решают численными методами на ПЭВМ с использованием современных пакетов программ, например MATLAB или MATCAD.

Если схема содержит j источников тока в m_j ветвях, порядок решаемой системы уменьшается. Поскольку токи m_j ветвей известны, число независимых контуров, не содержащих источники тока, для которых необходимо составить уравнения по второму закону Кирхгофа, равно $m - m_j - (n - 1)$.

3.2 Метод узловых потенциалов

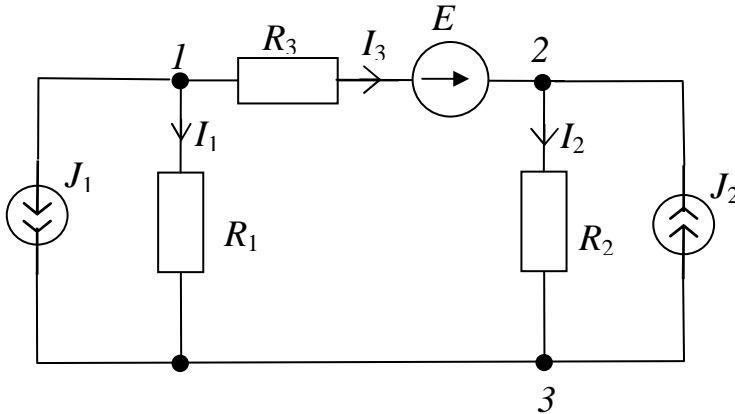
Метод узловых потенциалов позволяет уменьшить число совместно решаемых уравнений до $n - 1$, где n – число узлов схемы замещения сети. Метод основан на применении первого закона Кирхгофа и заключается в следующем.

1. Один узел схемы замещения принимается за базисный с нулевым потенциалом. Такое допущение не изменяет значения токов в ветвях, так как ток в каждой ветви зависит только от разности потенциалов узлов, а не от действительного значения этих потенциалов.

2. Для остальных $n - 1$ узлов составляют систему уравнений по первому закону Кирхгофа, выражая токи в ветвях через потенциалы узлов.

3. Решением полученной системы определяют потенциалы $n-1$ узлов относительно базисного, а затем токи ветвей по обобщенному закону Ома (2.18).

Рассмотрим применение метода узловых потенциалов на примере схемы цепи (см. рис. 3.2), содержащей $n = 3$ узла. Узел 3 принимаем базисным, т. е. $\varphi_3 = 0$. Для узлов 1 и 2 составляем уравнения по первому закону Кирхгофа:



Для узла 1

$$I_1 + I_3 + J_1 = 0,$$

для узла 2

$$I_2 - I_3 - J_2 = 0,$$

где

$$I_1 = (\varphi_1 - \varphi_3)/R_1 = \varphi_1/R_1;$$

$$I_2 = (\varphi_2 - \varphi_3)/R_2 = \varphi_2/R_2;$$

$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_2 + E)/R_3.$$

Рисунок 3.2 – Расчетная схема

После подстановки полученных значений токов в уравнения для 1 и 2-го узлов получим систему уравнений

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \varphi_1 - \frac{1}{R_3} \varphi_2 = -J_1 - \frac{E}{R_3}, \\ -\frac{1}{R_3} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \varphi_2 = J_2 + \frac{E}{R_3}. \end{cases} \quad (3.5)$$

Матричная форма записи системы (3.5) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} & -\frac{1}{R_3} \\ -\frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -J_1 & -\frac{E}{R_3} \\ J_2 & \frac{E}{R_3} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

или в более удобной форме записи

$$\begin{bmatrix} G_{11} & -G_{12} \\ -G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -J_1 & -G_3 E \\ J_2 & G_3 E \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

где G_{11} и G_{22} – собственные проводимости узлов 1 и 2, которые определяются как сумма проводимостей ветвей, подключенных соответственно к узлам 1 и 2;

G_{12} и G_{21} – взаимные проводимости узлов 1 и 2 (проводимость ветви, соединяющей узлы 1 и 2);

G_3 – проводимость ветви с ЭДС E , в нашем случае $G_{12} = G_3$.

Заметим, что первое уравнение системы (3.7) записано относительно узла 1, а второе – относительно узла 2. Правая часть системы содержит узловые токи, определяемые как алгебраическая сумма токов ветвей с источниками токов и токов короткого замыкания ветвей с источниками ЭДС, сходящихся к рассматриваемому узлу, причем слагаемые берутся со знаком плюс, если ток источника и ЭДС направлены к рассматриваемому узлу (от узла), и со знаком минус, если ток источника и ЭДС направлены от рассматриваемого узла.

В матричной форме записи система (3.7) имеет вид

$$\mathbf{G}_{ik} \cdot \varphi_k = \mathbf{I}_{yi}, \quad (3.8)$$

где $i, k = \overline{1, m - m_j - 1}$;

\mathbf{G}_{ik} – матрица собственных и взаимных проводимостей узлов;

φ_k – матрица-столбец потенциалов узлов;

\mathbf{I}_{yi} – матрица-столбец узловых токов.

Метод узловых потенциалов эффективнее метода контурных токов в случае, если число узлов в схеме меньше или равно числу независимых контуров. Данный метод особенно эффективен при расчете электрических цепей с двумя узлами и большим количеством параллельных ветвей. Если при этом принять потенциал одного из узлов равным нулю, например $\varphi_2 = 0$, то напряжение между узлами будет равно потенциалу первого узла

$$U_{12} = \varphi_1 = \frac{I_{y1}}{G_{i1}} = \frac{\sum_{k=1}^m E_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k}, \quad (3.9)$$

где n – число параллельных ветвей цепи;

m – число ветвей, содержащих источники ЭДС.

В некоторых случаях метод узловых потенциалов называют методом узловых напряжений, а его частный случай для двух узлов – методом узлового напряжения.

3.3 Метод контурных токов

Одним из методов, получивших широкое распространение, является метод контурных токов. Он позволяет уменьшить общее число m совместно решаемых уравнений на $(n - 1)$ и свести систему к числу $m - (n - 1)$ уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа.

В основу данного метода положено понятие о **контурных токах**. Под контурным током понимают **расчетный (условный) ток, замыкающийся только в своем контуре**.

Рассмотрим, например, схему цепи на рисунке 3.3. Разобьем ее на три соприкасающихся контура и условимся, что в каждом из них протекает свой контурный ток I_I , I_{II} , I_{III} . Направление этих токов выберем во всех

контурах одинаковым - по часовой стрелке, как показано на схеме. Сопоставляя контурные токи с токами ветвей, направление которых также нанесено на схему, можно установить, что величины контурных токов совпадают с величинами действительных токов только во внешних ветвях:

$$I_I = I_1, \quad I_{II} = -I_6, \quad I_{III} = I_3. \quad (3.10)$$

Токи же смежных ветвей равны разности контурных токов соседних контуров:

$$I_2 = I_{II} - I_{III}, \quad I_4 = I_I - I_{II}, \quad I_5 = I_{III} - I_I. \quad (3.11)$$

Следовательно, по известным контурным токам схемы легко можно определить действительные токи ее ветвей.

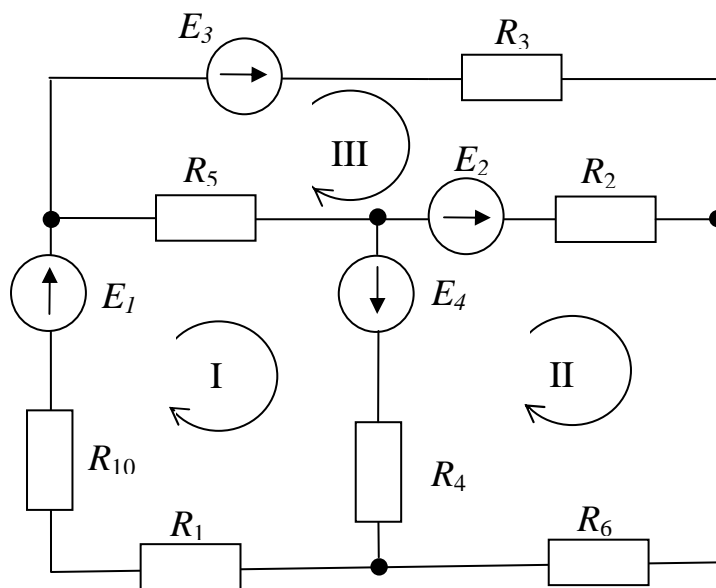


Рисунок 3.3 - Схема сложной цепи для определения токов методом контурных токов

Для определения контурных токов данной схемы достаточно составить только три уравнения для каждого из контуров:

$$\begin{cases} \text{для контура I: } (R_1 + R_{10} + R_5 + R_4)I_I - R_4I_{II} - R_5I_{III} = E_1 + E_4, \\ \text{для контура II: } (R_2 + R_6 + R_4)I_{II} - R_4I_I - R_2I_{III} = E_2 - E_4, \\ \text{для контура III: } (R_2 + R_5 + R_3)I_{III} - R_5I_I - R_2I_{II} = E_3 - E_2. \end{cases} \quad (3.12)$$

Решая полученную систему уравнений, определим контурные токи, а на их основании – действительные токи ветвей.

Методом контурных токов часто пользуются для доказательства других возможных методов расчета и для анализа цепей в общем виде. В этом случае уравнения, составляемые для контурных токов, записывают в обобщенном виде. Для этого **суммарное сопротивление данного контура обозначают двумя нижними индексами, указывающими номер контура, и называют его собственным сопротивлением контура.**

Так, собственные сопротивления трех контуров схемы равны:

$$\begin{cases} R_{11} = R_1 + R_{10} + R_5 + R_4, \\ R_{22} = R_2 + R_6 + R_4, \\ R_{33} = R_2 + R_5 + R_3. \end{cases} \quad (3.13)$$

Общие сопротивления смежных контуров рассматривают как коэффициенты при токах и обозначают двумя нижними индексами, указывающими, между какими соседними контурами включено это сопротивление. Так, например, для рассматриваемой схемы

$$R_{12} = R_4, \quad R_{13} = R_5, \quad R_{23} = R_2. \quad (3.14)$$

Учитывая эти обозначения, уравнения (3.12) можно переписать в более общем виде:

$$\begin{cases} R_{11}I_I - R_{12}I_{II} - R_{13}I_{III} = E_I, \\ -R_{21}I_I + R_{22}I_{II} - R_{23}I_{III} = E_{II}, \\ -R_{31}I_I - R_{32}I_{II} + R_{33}I_{III} = E_{III}. \end{cases} \quad (3.15)$$

ЭДС в этих уравнениях являются контурными ЭДС, величины которых определяют алгебраическим суммированием отдельных ЭДС ветвей данного контура. При этом ЭДС, совпадающие с направлением контурного тока, суммируют со знаком "плюс":

$$E_I = E_1 + E_4, \quad E_{II} = E_2 - E_4 \quad \text{и} \quad E_{III} = E_3 - E_2. \quad (3.16)$$

Матричная форма записи системы (3.15) имеет вид

$$\begin{bmatrix} R_{11} & -R_{12} & -R_{13} \\ -R_{21} & R_{22} & -R_{23} \\ -R_{31} & -R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_I \\ E_{II} \\ E_{III} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

где коэффициенты матрицы-столбца контурных ЭДС определяются соотношениями (3.16).

В общем виде, для схемы произвольной конфигурации система уравнений контурных токов имеет вид

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{E}, \quad (3.18)$$

где \mathbf{R} - квадратная матрица коэффициентов при неизвестных контурных токах;

\mathbf{I} - матрица-столбец неизвестных контурных токов;

\mathbf{E} - матрица-столбец контурных ЭДС.

Решение системы уравнений (3.18) имеет вид

$$\mathbf{I} = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{E}, \quad (3.19)$$

где \mathbf{R}^{-1} - матрица, обратная матрице коэффициентов \mathbf{R} .

3.4 Принцип суперпозиции (метод наложения)

Принцип суперпозиции (наложения) является одним из важнейших физических принципов, который используется при рассмотрении явлений, возникающих под воздействием нескольких причин. Сложные явления по этому принципу подразделяются на более простые, в которых действует каждая из причин в отдельности независимо от других, а результаты этих воздействий (отклики), накладываясь один на другой, образуют суммарный отклик. В электростатике, например, напряженность поля в какой-либо точке от нескольких точечных зарядов определяется на основе принципа суперпозиции как геометрическая сумма напряженностей полей точечных зарядов, действующих независимо друг от друга, а потенциал точки этого поля - как результат наложения (алгебраического суммирования) потенциалов каждого из зарядов в отдельности. В механике принцип суперпозиции рассматривается как принцип независимого действия сил.

Применительно к электрическим цепям **принцип суперпозиции** заключается в том, что *воздействие нескольких источников на какой-либо элемент цепи можно рассматривать как результат суммирования воздействий на этот элемент каждой из ЭДС источника в отдельности независимо от других.*

Принцип суперпозиции используется и для того, чтобы результат воздействия одной ЭДС сложной формы можно было заменить воздействием составляющих ЭДС более простых форм.

Метод расчета цепи, использующий принцип суперпозиции, называется методом наложения. При помощи этого метода расчет сложной цепи с несколькими ЭДС сводят к расчету нескольких цепей с одним источником питания. Ток в любой ветви рассматривают как результат наложения токов, получающихся от отдельных ЭДС, действующих независимо друг от друга.

Рассмотрим порядок расчета по методу наложения на примере схемы рисунка 3.1. Для определения токов вначале считаем, что в схеме действует только ЭДС E_1 . При этом сопротивления всех ветвей, включая и внутренние сопротивления источников, считаем неизменными. Определение частичных токов I'_1, I'_2, \dots, I'_6 отдельных ветвей от ЭДС E_1 сводим к расчету схемы цепи на рисунке 3.4, а. Далее повторяем расчет поочередно для остальных ЭДС. В нашем случае для ЭДС E_2 , по схеме цепи (рис. 3.4, б) определяем частичные токи $I''_1, I''_2, \dots, I''_6$.

Алгебраическое суммирование частичных токов дает значение действительных токов ветвей, положительные направления которых должны быть предварительно нанесены на исходную схему (см. рис. 3.1).

Учитывая направления частичных и результирующих токов, получим:

$$\begin{cases} I_1 = I_1' - I_1'', \\ I_2 = -I_2' + I_2'', \\ \dots\dots\dots, \\ I_6 = -I_6' + I_6''. \end{cases} \quad (3.20)$$

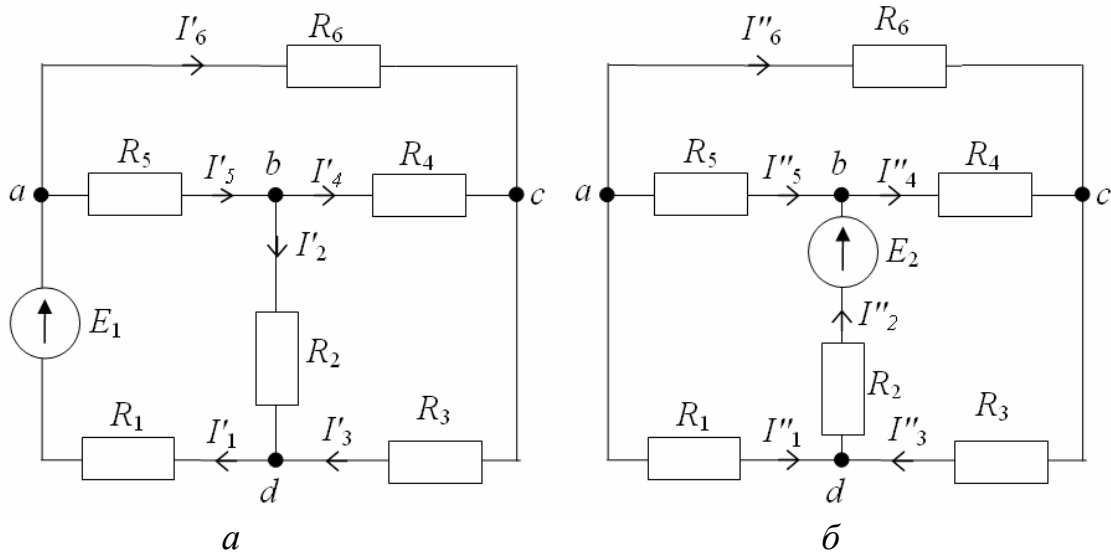


Рисунок 3.4 - Схемы цепи для определения токов по методу наложения от ЭДС E_1 (а) и E_2 (б)

Число слагаемых в системе уравнений (3.20) равно числу ЭДС схемы.

Следует обратить внимание на то, что метод наложения неприменим к расчету мощностей, так как значения последних пропорциональны квадратам токов.

3.5 Принцип взаимности

Линейные электрические цепи постоянного тока с одним источником питания обладают свойством взаимности (обратимости). Оно заключается в том, что если ЭДС E ветви n цепи вызывает ток I_k в ветви k , то эта же ЭДС, действуя в ветви k , вызовет в ветви n ток I_k той же величины $I_n = I_k$.

Рассмотрим принцип взаимности на примере схем цепей рисунка 3.5. ЭДС E первой ветви схемы (рис. 3.5, а) вызывает в резисторе с R_5 ток I_5 , равный току третьего контура $I_{III} = I_5$. Чтобы найти ток I_{III} при помощи определителей, запишем для каждого из контуров их ЭДС, собственные и общие сопротивления.

Для контура I:

$$E_I = E, \quad R_{11} = R_1 + R_2, \quad R_{12} = R_2, \quad R_{13} = 0.$$

Для контура II:

$$E_{II} = 0, \quad R_{22} = R_2 + R_3 + R_4, \quad R_{21} = R_2, \quad R_{23} = R_4.$$

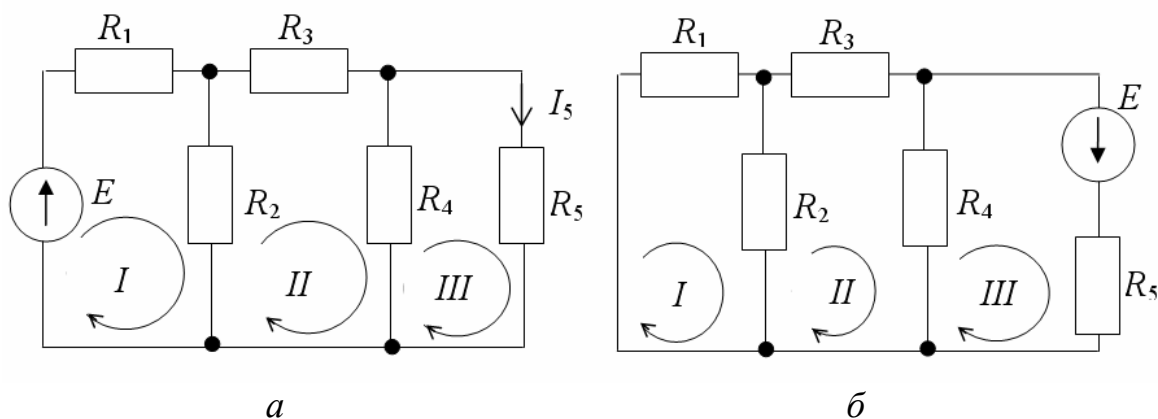


Рисунок 3.5 - Схемы цепи для иллюстрации принципа взаимности для токов I_5 (а) и I_1 (б)

Для контура III:

$$E_{III} = 0, \quad R_{33} = R_4 + R_5, \quad R_{32} = R_4, \quad R_{31} = 0.$$

Ток третьего контура ($k = 3$) от ЭДС первого контура ($n = 1$)

$$I_3 = \sum_{n=1}^3 \frac{A_{nk}}{\Delta} E_n = \frac{A_{13}}{\Delta} E_I + \frac{A_{23}}{\Delta} E_{II} + \frac{A_{33}}{\Delta} E_{III},$$

или

$$I_{III} = I_5 = \frac{A_{13}}{\Delta} E_1 = \frac{A_{13}}{\Delta} E. \quad (3.21)$$

Определитель системы Δ , его минор M_{13} и алгебраическое дополнение A_{13} соответственно равны:

$$\Delta = \begin{vmatrix} r_{11} & -r_{12} & -r_{13} \\ -r_{21} & r_{22} & -r_{23} \\ -r_{31} & -r_{32} & r_{33} \end{vmatrix}, \quad M_{13} = \begin{vmatrix} -r_{21} & r_{22} \\ -r_{31} & -r_{23} \end{vmatrix} = r_{21}r_{23} + r_{22}r_{31},$$

$$A_{13} = (-1)^{1+3} M_{13} = M_{13}.$$

Для схемы цепи на рисунке 3.5, б собственные и общие сопротивления, а следовательно и определитель Δ , останутся без изменения. Контурные ЭДС этой схемы: $E_I = 0$, $E_{II} = 0$ и $E_{III} = E$. Поэтому ток первого контура ($k = 1$) от ЭДС третьего контура ($k = 3$)

$$I_{k=1} = \sum_{n=1}^3 \frac{A_{nk}}{\Delta} E_n = \frac{A_{11}}{\Delta} E_1 + \frac{A_{21}}{\Delta} E_{II} + \frac{A_{31}}{\Delta} E_{III},$$

или

$$I_I = \frac{A_{31}}{\Delta} E_{III} = \frac{A_{31}}{\Delta} E. \quad (3.22)$$

Минор M_{31} получаем из определителя Δ вычеркиванием в нем третьей строки и первого столбца:

$$M_{31} = \begin{vmatrix} -r_{12} & -r_{13} \\ r_{22} & -r_{23} \end{vmatrix} = r_{12}r_{23} + r_{22}r_{13}.$$

Алгебраическое дополнение

$$A_{31} = (-1)^{3+1} M_{13} = M_{31}.$$

Значения $A_{13} = A_{31}$, поэтому согласно (3.21) и (3.22) $I_I = I_{III} = I_5$.

3.6 Метод эквивалентного генератора

В некоторых случаях бывает необходимо исследовать режимы работы одной из ветвей сложной электрической цепи при изменении сопротивления этой же ветви. При этом нет нужды производить громоздкий расчет всей цепи каким-либо из рассмотренных выше методов, а целесообразнее воспользоваться методом эквивалентного генератора. Согласно этому методу *воздействие всех источников сложной электрической цепи на исследуемую ветвь можно заменить воздействием последовательно соединенного с ветвью эквивалентного генератора*, имеющего ЭДС $E_{\text{ЭКВ}}$ и внутреннее сопротивление $R_{\text{ЭКВ}}$.

Покажем возможность такой замены для определения тока в ветви резистора с изменяющимся сопротивлением R схемы цепи на рисунке 3.6, а. Пусть ЭДС E_1, E_2, E_3 и сопротивления R_1, R_2, R_3 резисторов этой схемы заданы. Для установления зависимости тока от сопротивления R выделим эту ветвь, а остальную часть схемы заключим в пунктирный прямоугольник, показав зажимы a и b , при помощи которых она сопрягается с исследуемой ветвью (рис. 3.6, б). Выделенная часть схемы, имеющая два зажима, является активным двухполюсником А. Буква А в прямоугольнике схемы на рисунке 3.6, б показывает, что результирующее воздействие ЭДС E_1, E_2 и E_3 на исследуемую ветвь не равно нулю.

Включим в исследуемую ветвь две равные по величине и противоположные по направлению ЭДС E' и E'' (рис. 3.6, в). Ток I ветви от этого не изменится и будет равен току исходной схемы (рис. 3.6, б).

Ток I схемы (рис. 3.6, в) рассматриваем как результат наложения токов I_a схемы рисунка 3.6, г от действия ЭДС E', E_1, E_2, E_3 и тока I_b схемы рисунка 3.6, д от действия ЭДС E'' . Ветви части схемы рисунка 3.13, д, заключенной в прямоугольник, являются пассивными, поэтому они обозначены буквой П.

Чтобы ток I исследуемой ветви был равен току I_b , схемы рисунка 3.6, д, в схеме рисунка 3.6, г ЭДС E' выбираем такой величины, при которой ток I_a будет равен нулю. Это условие может быть соблюдено, если ЭДС E' будет равна напряжению холостого хода между зажимами a и b схемы: $E' = U_{\text{аб.хх}}$.

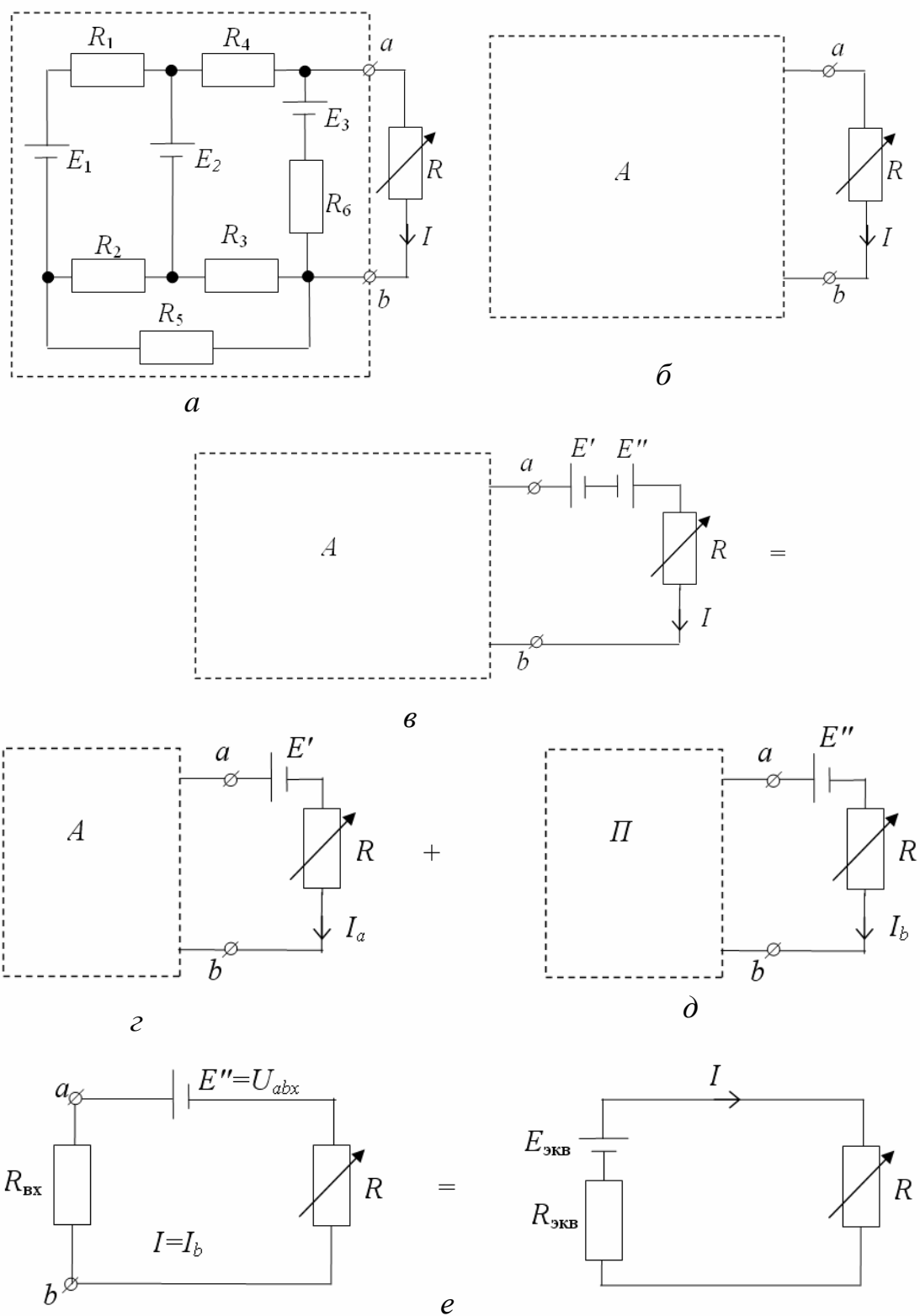


Рисунок 3.6 - Схема сети для расчета по методу эквивалентного генератора

Значение ЭДС E' для этих условий можно определить и аналитически. В этом случае для схемы рисунка 3.6, г составим уравнение для тока, пользуясь законом Ома для участка с ЭДС E' и напряжением U_{ab} :

$$I_a = \frac{U_{ab} - E'}{R}.$$

Из этого уравнения видно, что при токе I_a , равном нулю, ЭДС E' равна напряжению холостого хода $U_{ab.xx}$ между зажимами a и b схемы.

Таким образом, для определения тока I исходной схемы достаточно рассмотреть только схему (рис. 3.6, δ) с действующей в ней ЭДС $E'' = E' = U_{ab.xx}$. Эта схема состоит из последовательно соединенных резистивного элемента с сопротивлением R исследуемой ветви и резистивного элемента с сопротивлением остальной части цепи относительно зажимов a и b (рис. 3.6, e).

Для определения входного сопротивления относительно зажимов левой части схемы (рис. 3.6, δ), необходимо выполнить преобразования сопротивлений пассивного двухполюсника в эквивалентное сопротивление, равное его входному сопротивлению R_{ab} . Последовательность преобразований показана на рисунке 3.7. Определяем эквивалентное сопротивление между точками 1 – 2

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Эквивалентное сопротивление между точками 2 – 3

$$R_{23} = \frac{R_3(R_{12} + R_5)}{R_3 + R_{12} + R_5}.$$

Входное сопротивление схемы:

$$R_{BX} = R_{43} = \frac{R_6(R_4 + R_{23})}{R_6 + R_4 + R_{23}}. \quad (3.23)$$

Воздействие ЭДС $E'' = U_{ab.xx}$ на сопротивление R схемы (рис. 3.6, e) можно представить как воздействие эквивалентного генератора с ЭДС $E_{\text{экв}}$, равной напряжению холостого хода между зажимами ab , к которым подключена исследуемая ветвь:

$$E_{\text{экв}} = E'' = U_{ab.xx}. \quad (3.24)$$

Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора равно входному сопротивлению остальной пассивной части цепи относительно зажимов a и b , к которым присоединена исследуемая ветвь:

$$R_{\text{экв}} = R_{\text{вх}}. \quad (3.25)$$

Зная ЭДС $E_{\text{экв}}$ и внутреннее сопротивление $R_{\text{экв}}$ эквивалентного генератора (см. рис. 3.6, е), можно определить ток исследуемой ветви:

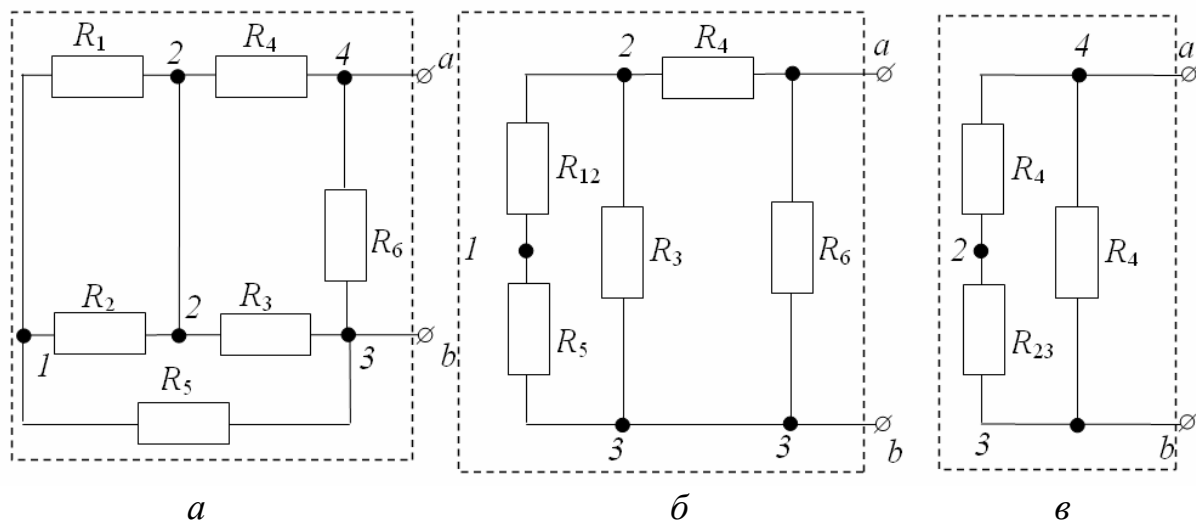


Рисунок 3.7 - Последовательность преобразования сопротивлений пассивного двухполюсника

$$I = \frac{E_{\text{экв}}}{R + R_{\text{экв}}} \quad (3.26)$$

Описанный метод определения тока в одной ветви сложной электрической цепи называют **методом эквивалентного генератора или методом активного двухполюсника**. Методом эквивалентного генератора он называется потому, что воздействие на исследуемую ветвь всей остальной части цепи заменяется воздействием эквивалентного генератора. Методом активного двухполюсника его называют потому, что по отношению к исследуемой ветви остальную часть цепи, присоединенную к исследуемой ветви с двумя выходными зажимами a и b , называют двухполюсником. Общее сопротивление ветвей, образующих пассивный двухполюсник (см. рис. 3.6, д) относительно зажимов a и b , называют **входным сопротивлением двухполюсника**. Оно равно внутреннему сопротивлению эквивалентного генератора.

Выводы

1. Существует несколько методов расчета сложных цепей. Выбор метода зависит от конфигурации схемы, имеющихся исходных данных и цели исследования цепей.
2. С помощью законов Ома и Кирхгофа можно рассчитать любую схему. Для схем сложной структуры получается система с большим числом уравнений.
3. Метод узловых потенциалов позволяет свести порядок решаемой системы до $n-1$ уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа.

4. Метод контурных токов позволяет свести порядок системы до $m-n+1$ уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. В основу метода положены расчетные (условные) контурные токи, замыкающиеся по смежным контурам разветвленных электрических цепей. Истинные значения токов в ветвях цепи определяются по значениям контурных токов.

5. Метод узловых потенциалов эффективнее метода контурных токов, если число узлов в схеме меньше или равно числу независимых контуров.

6. Воздействие нескольких источников питания (ЭДС и напряжений) на какой-либо элемент цепи можно рассматривать как суммарный результат воздействия на этот элемент каждого источника в отдельности, независимо от других источников (метод наложения).

7. Метод эквивалентного генератора позволяет в ряде случаев относительно просто определить ток в какой-либо одной ветви сложной электрической цепи и исследовать поведение этой ветви при изменении ее сопротивления. При этом по отношению к исследуемой ветви сложная цепь с несколькими источниками питания заменяется эквивалентным активным двухполюсником с одним источником питания (эквивалентным генератором) с ЭДС $E_{\text{экв}}$ и внутренним сопротивлением $R_{\text{экв}}$.

8. Активным считается двухполюсник, внутри которого имеется хотя бы один источник ЭДС или тока. При отсутствии источников внутри двухполюсника он считается пассивным.

Вопросы для самопроверки

1. Чему равно число независимых узлов (контуров) схемы произвольной конфигурации?

2. Как выбирается базисный узел в методе узловых потенциалов?

3. Сколько уравнений можно составить по методу узловых потенциалов?

4. Объясните порядок расчета схемы методом узловых потенциалов.

5. Объясните матричную форму записи уравнений, составленных по методу узловых потенциалов.

6. Объясните преимущества метода узловых потенциалов.

7. Что понимают под контурным током?

8. Как выбирают направления обхода контуров в методе контурных токов?

9. Объясните матричную форму записи уравнений, составленных по методу контурных токов.

10. Объясните суть принципа суперпозиции.

11. Объясните суть принципа взаимности.

12. Объясните суть метода эквивалентного генератора.

13. В каких случаях предпочтительно применение метода эквивалентного генератора?

Раздел II. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ключевые понятия: переменный ток, периодический переменный ток, действующее значение напряжения (ЭДС, тока), среднее значение напряжения (ЭДС, тока), фаза, угловая частота, угол сдвига фаз, векторная диаграмма, комплексное значение, вектор комплексного значения.

4.1 Основные сведения о переменном токе

Цепи с изменяющимися (переменными) токами по сравнению с цепями постоянного тока имеют ряд особенностей. Эти особенности определяются тем, что переменные токи и напряжения отдельных элементов электротехнических устройств порождают в них переменные электрическое и магнитное поля. В результате изменения этих полей в электрической цепи возникают явления самоиндукции, взаимной индукции и токов смещения, которые оказывают существенное влияние на протекающие в цепи процессы. Анализ процессов в цепях усложняется.

В настоящее время переменный ток находит широкое применение в технике, так как он легко трансформируется и передается на большие расстояния при высоком напряжении и малых потерях. Экономический эффект при этом огромен. Кроме того, электрические машины и другие электротехнические устройства, предназначенные для работы в цепях переменного тока, относительно просты и достаточно надежны в эксплуатации.

Переменный ток применяют в различных областях электротехники (электропривод, электротермия, электросвязь, радиотехника и т. д.). Его использование на предприятиях строительной отрасли и на строительных площадках позволяет эффективно реализовывать многие технологические процессы отрасли.

Электрический ток, изменяющийся с течением времени, называют *переменным*. Если мгновенные значения и направления тока через равные промежутки времени (периодически) повторяются, то такой ток называют *периодическим*.

Электрические цепи периодического переменного тока классифицируют в зависимости от формы кривой тока и его частоты, от характера параметров и сложности электрических схем замещения, от назначения.

Различают следующие виды электрических цепей переменного тока: однофазные и многофазные; линейные и нелинейные; цепи с сосредоточенны-

ми и распределенными параметрами; с взаимоиנדуктивностями и без взаимоиנדуктивностей; простые и сложные (к сложным можно отнести многофазные цепи).

Из всех возможных форм периодических токов наибольшее распространение получили синусоидальные токи. Преимущество синусоидальных токов состоит в том, что они позволяют наиболее экономично осуществлять производство, передачу, распределение и использование электрической энергии. Только синусоидальные токи позволяют сохранить неизменными формы кривых напряжений и токов на всех участках сложной линейной электрической цепи.

На Украине, как и в большинстве стран мира, производство и передача электрической энергии осуществляются на трехфазном синусоидальном токе частотой 50 Гц (в США, Канаде, Японии и некоторых государствах Центральной и Южной Америки – 60 Гц).

Различные области техники используют весьма широкий диапазон частот синусоидального тока в зависимости от технических потребностей. В авиации, например, успешно применяется синусоидальный ток частотой 400 Гц, так как при такой частоте снижаются габаритные размеры и вес авиационного оборудования. В электротермических установках используют диапазон частот от 500 Гц до 50 МГц. Частоты от нескольких сотен мегагерц до миллиарда герц применяют в радиотехнике.

В данной теме рассмотрены вопросы, относящиеся к цепям с токами, изменяющимися по произвольному закону. При анализе подобных цепей составляют электрические схемы замещения, состоящие из идеальных элементов - идеального источника ЭДС, резистивного элемента, индуктивного элемента, емкостного элемента и элемента взаимной индукции. Каждый из этих элементов отражает определенное явление и вводится в схему замещения, когда это явление замещаемой цепи хотят учесть.

Поскольку идеальные элементы R , L , C (рис. 4.1) являются пассивными, положительные направления токов и напряжений в них совпадают. В источнике питания положительные направления тока и ЭДС так же совпадают. Таким образом, положительное направление напряжения источника противоположно положительному направлению его ЭДС. При этом положительные значения мгновенных мощностей приемника $p = u \cdot i$ и источника $p = e \cdot i$ означают, что первый из них работает приемником, а второй - источником. При отрицательных значениях мгновенных мощностей первый находится в режиме источника, а второй - в режиме приемника.

Рассмотрим более подробно каждый из элементов схемы замещения цепи с изменяющимися токами.

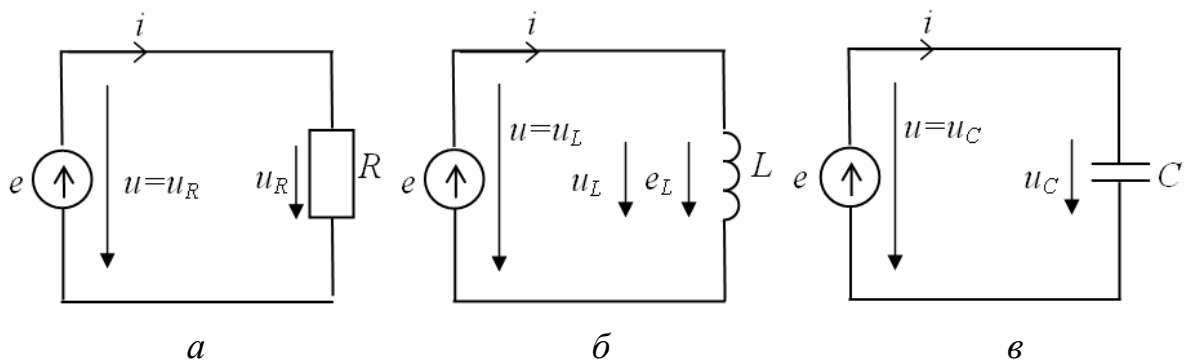


Рисунок 4.1 – Положительные направления ЭДС, тока и напряжения идеальных резистивного (а), индуктивного (б) и емкостного (в) элементов

4.2 Элементы схемы замещения с изменяющимися токами

4.2.1 Резистивный элемент схемы замещения. Резистивный элемент является пассивным элементом схемы замещения, характеризующим наличие в замещаемом элементе необратимых процессов преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Параметром резистивного элемента является его активное сопротивление r , в котором поглощается электрическая энергия, равная энергии, потребляемой реальным замещаемым элементом электрической цепи.

Резистивный элемент, например, может характеризовать сопротивление реального проводника протекающему по нему току. При этом в нем рассеивается энергия, равная тепловой энергии, выделяемой в проводнике. Активное сопротивление проводника переменному току больше, чем постоянному току. Это объясняется тем, что плотность переменного тока в сечении проводника неравномерна, т. к. имеет место поверхностный эффект (вытеснение тока к поверхности проводника). В результате потери энергии на нагрев возрастают, а следовательно, сопротивление проводника, характеризующее эти потери, увеличивается.

Резистивным элементом в схеме замещения учитывают также наличие потерь энергии в магнитном сердечнике катушки, которая включена в цепь с изменяющимся током. В дальнейшем будут приведены и другие примеры, когда резистивный элемент в схеме замещения характеризует наличие необратимых процессов преобразования электрической энергии в другие виды энергии в реальной электрической цепи.

Напряжение u и ток i резистивного элемента связаны между собой уравнением, составленным по закону Ома для мгновенных значений:

$$u_R = R \cdot i. \quad (4.1)$$

Уравнение (4.1) указывает на весьма важное свойство резистивного элемента: кривая u_R повторяет форму кривой тока.

Мгновенная мощность, выделяемая на резистивном элементе, определяется по формуле

$$p_R = u_R \cdot i = R \cdot i^2, \quad (4.2)$$

она не зависит от знака тока и всегда положительна. Положительный знак мощности указывает на то, что в резистивный элемент независимо от направления тока энергия всегда поступает от источника и преобразуется в нем в тепловую энергию.

4.2.2 Индуктивный элемент схемы замещения. Индуктивный элемент схемы замещения реальной цепи с изменяющимся током характеризует наличие изменяющегося магнитного поля, созданного этим током.

В электрических цепях постоянного тока магнитное поле, созданное током, не изменяется и, следовательно, не оказывает влияния на режим работы цепи. В цепях с изменяющимся током всякое изменение тока I в элементе цепи, вызывающее изменение его собственного потокосцепления Ψ_L , в соответствии с законом электромагнитной индукции сопровождается наведением ЭДС e_L в этом элементе. Это явление называют *самоиндукцией*, а наведенные при этом ЭДС - ЭДС самоиндукции.

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея) формулируется следующим образом: величина ЭДС e , наведенная в замкнутом проводнике, образующем контур, пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ , пронизывающего этот контур

$$e = \frac{-d\Phi}{dt}.$$

Знак минус отражает закон Ленца [36], в соответствии с которым индуктированный ток всегда стремится воспрепятствовать изменению магнитного потока контура.

По закону электромагнитной индукции ЭДС самоиндукции определяется скоростью изменения собственного потокосцепления:

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt}. \quad (4.3)$$

Величина собственного потокосцепления индуктивного элемента Ψ_L пропорциональна величине тока i в нем: $\Psi_L = L \cdot i$. Поэтому формула для ЭДС самоиндукции может быть записана в более общем виде:

$$e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (4.4)$$

Из (4.3) и (4.4) видно, что **индуктивность L** элемента цепи можно рассматривать как **коэффициент пропорциональности между потокосцеплением Ψ_L и током i элемента**, или как коэффициент пропорциональности между скоростью изменения тока элемента цепи di/dt и ЭДС самоиндукции e_L , наведенной в этом элементе.

При исследовании цепей с ЭДС самоиндукции условились положительное направление ЭДС самоиндукции принимать совпадающим с положительным направлением тока, наводящим эту ЭДС. Поэтому стрелки ЭДС e_L и тока i на схеме (см. рис. 4.1, б) имеют одинаковое направление. В соответствии с этим действительное направление ЭДС совпадает с направлением, обозначенным на схеме стрелкой при убывании тока в цепи, когда $di/dt < 0$, а $e_L > 0$; возрастающий в цепи ток наводит ЭДС e_L , действительное направление которой противоположно направлению, обозначенному стрелкой.

Для того чтобы в катушке индуктивности без потерь был переменный ток, между ее выводами должно быть напряжение, равное по абсолютной величине и в каждый момент противоположное по направлению ЭДС самоиндукции

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} = \frac{d\Psi}{dt}. \quad (4.5)$$

Основная единица измерения потокосцепления и магнитного потока в системе СИ – вебер (Вб), $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$; индуктивности – генри (Гн), $1 \text{ Гн} = \text{Вб}/\text{А} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}/\text{с}$.

Рассмотрим изменения тока в индуктивном элементе схемы (рис. 4.1, б). Если в течение какого-то интервала времени мгновенное значение тока положительно ($i > 0$) и определяется возрастающим участком кривой ($di/dt > 0$), то напряжение на индуктивном элементе будет также положительно ($u_L > 0$). Это означает, что в указанном интервале времени направление напряжения u_L совпадает с положительным направлением этого напряжения, обозначенным на схеме стрелкой.

Мгновенная мощность индуктивного элемента $p_L = u_L \cdot i$ положительна ($p_L > 0$). Следовательно, энергия в этот интервал времени поступает от источника в цепь и преобразуется в энергию магнитного поля $L \cdot i^2/2$.

При положительном ($i > 0$), но убывающем токе в катушке ($di/dt < 0$) значения напряжения и мгновенной мощности отрицательны ($u_L < 0$, $p < 0$). Энергия из магнитного поля возвращается к источнику. Таким образом, в процессе возрастания и убывания тока в индуктивном элементе имеет место обмен энергией между источником и магнитным полем.

4.2.3 Емкостной элемент схемы замещения. Между различными частями электротехнических устройств существует электрическое поле зарядов, находящихся на этих частях устройств. Емкостной элемент (конденсатор) вводится в схему замещения реальной цепи с изменяющимся током, когда хотят учесть влияние изменяющегося электрического поля элементов цепи.

Если между обкладками конденсатора приложено изменяющееся напряжение u_c (см. рис. 4.1, в), то на обкладках накапливается заряд

$$q = C \cdot u_c, \quad (4.6)$$

где коэффициент пропорциональности C называется **емкостью** конденсатора.

Напряжение и ток емкостного элемента связаны уравнением

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}. \quad (4.7)$$

Если напряжение u_c возрастает, ток положителен ($i > 0$). Это означает, что в текущий момент времени ток имеет направление, совпадающее с условным положительным направлением напряжения u_c (см. рис. 4.1, в). Заряд и энергия электрического поля $W_{\text{э}} = C \cdot u_c^2 / 2 = q \cdot u_c / 2$ при этом возрастают. Энергия от источника передается электрическому полю.

Когда напряжение u_c убывает, убывает и заряд а энергия от поля возвращается к источнику. Таким образом, в емкостном элементе цепи имеет место обмен энергией между источником и электрическим полем. Если задан закон изменения тока в емкостном элементе, то напряжение на нем определяется уравнением

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt + \text{const}. \quad (4.8)$$

При рассмотрении процессов в цепях с изменяющимися токами постоянную const в уравнении (4.8) обычно считают равной нулю, так как напряжение u_c не имеет постоянной составляющей ($u_c = \text{const} = 0$).

4.3 Действующие и средние значения периодических напряжений и токов

4.3.1 Действующие значения периодических напряжений и токов. Для оценки эффективности действия периодического тока используют его тепловое или электродинамическое действие и сравнивают с аналогичным действием постоянного тока за тот же интервал времени, равный одному периоду.

Значение периодического тока, равное такому значению постоянного тока, который за время одного периода производит такой же тепловой или электродинамический эффект, что и периодический ток, называют действующим значением периодического тока. Действующие значения тока, напряжения и ЭДС обозначают прописными буквами без индексов: I , U , E .

При оценке периодического тока i , пользуясь тепловым эффектом, принимают, что постоянный ток I и периодический ток i одного и того же резистивного элемента с активным сопротивлением R выделяют одинаковое количество тепла за время T , равное одному периоду

$$R \cdot I^2 \cdot T = \int_0^T R i^2 dt.$$

Из этого уравнения получают действующее значение тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad (4.9)$$

равное среднеквадратичному значению периодического тока.

Аналогично действующие значения напряжения и ЭДС являются среднеквадратичными значениями периодических напряжения и ЭДС

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad \text{и} \quad E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt}. \quad (4.10)$$

Электроизмерительные приборы тепловой, электромагнитной, электродинамической и электростатической систем имеют подвижные части, отклонения которых пропорциональны среднеквадратичным значениям измеряемых ими величин. Поэтому эти приборы измеряют действующие значения периодических токов и напряжений (см. тему 7).

4.3.2 Средние значения периодических напряжений, токов и мощности. В общем случае под средним значением периодических функций понимают их средние арифметические значения за период.

Среднее значение мощности за период определяется уравнением

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (4.11)$$

Если положительные и отрицательные полуволны кривой изменения мощности не равны, то среднее значение определяют разностью площадей, ограниченных кривыми полуволн и осью абсцисс.

Как правило, отрицательные полуволны периодических токов, напряжений и ЭДС повторяют их положительные полуволны. Поэтому под средними значениями периодических токов напряжений и ЭДС понимают средние максимальные значения их полуволн:

$$\begin{cases} I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt \\ U_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt. \\ E_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e dt \end{cases} \quad (4.12)$$

4.4 Представление синусоидальных напряжений и токов на плоскости декартовых координат

Синусоидальные токи и напряжения можно изобразить графически, записать при помощи уравнений с тригонометрическими функциями и

представить в виде вращающихся векторов на декартовой или комплексной плоскости.

Приведенным на рисунке 4.2, *a* и *б* графикам двух синусоидальных ЭДС e_1 и e_2 соответствуют уравнения:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e1}),$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - \psi_{e2}).$$

Значения аргументов синусоидальных функций $\omega t + \psi_{e1}$, и $\omega t - \psi_{e2}$ называют **фазами синусоид**, а значение фазы в начальный момент времени ψ_{e1} , и ψ_{e2} – **начальной фазой**.

Если первые ближайшие от начала координат точки перехода синусоид от отрицательных значений к положительным значениям (точки *a* и *б* кривых на рис. 4.2) считать за начало первого периода синусоиды, то начальная фаза, расположенная слева от оси ординат, отсчитывается со знаком "плюс", а начальная фаза, расположенная справа от оси ординат, - со знаком "минус".

Величину ω в фазах синусоид, характеризующую скорость изменения фазового угла, называют **угловой частотой**. Так как фазовый угол синусоиды за время одного периода T изменяется на 2π , то угловая частота

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f. \quad (4.13)$$

При совместном рассмотрении двух синусоидально изменяющихся величин одной частоты разность их фазовых углов, равную разности начальных фаз, называют **углом сдвига фаз**. Угол сдвига фаз одноименных синусоидальных функций (ЭДС, напряжений, токов) обозначают буквой α . Угол сдвига фаз между синусоидами напряжения и тока элемента цепи обозначают буквой φ .

Для синусоид ЭДС e_1 и e_2 графики которых изображены на рисунке 4.2, угол сдвига фаз

$$\alpha = \omega t + \psi_{e1} - (\omega t - \psi_{e2}) = \psi_{e1} + \psi_{e2}. \quad (4.14)$$

Для синусоид напряжения и тока $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, графики которых изображены на рисунке 4.3, угол сдвига фаз

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Пользуясь углом сдвига фаз, уравнения напряжения и тока можно записать иначе:

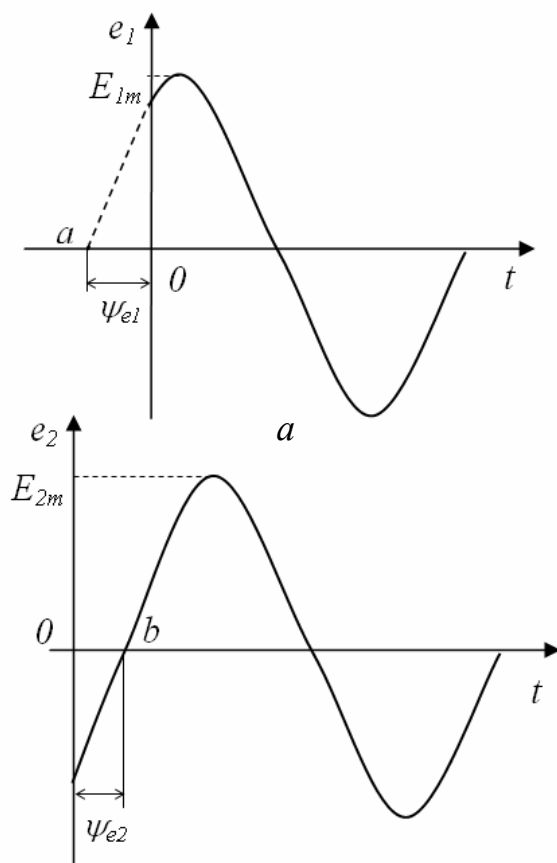
$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi),$$

или

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi).$$



б

Рисунок 4.2 – Графики синусоидальных ЭДС с различными начальными фазами

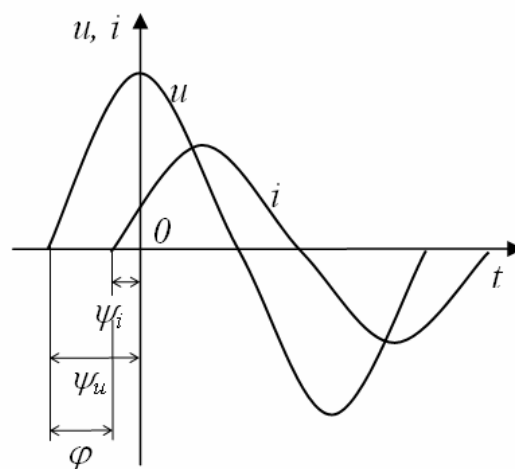


Рисунок 4.3 – Обозначения начальных фаз и сдвига фаз синусоидальных напряжения и тока

Эти выражения показывают, что синусоидальный ток отстает по фазе от синусоидального напряжения на угол φ , или синусоидальное напряжение опережает по фазе синусоидальный ток на угол φ .

При изображении синусоидальных ЭДС, напряжений и токов вращающимися векторами на декартовой плоскости из начала координат строят векторы, равные амплитудным значениям синусоидальных величин и вращают эти векторы против часовой стрелки с угловой скоростью, равной угловой частоте ω . Фазовый угол при вращении отсчитывают от положительной оси абсцисс, как показано на рисунке 4.4 для $t > 0$. Проекции вращающихся векторов на ось ординат равны мгновенным значениям ЭДС e_1 и e_2 .

Совокупность векторов, изображающих синусоидальные ЭДС, напряжения и токи одной частоты, называют **векторными диаграммами**.

При построении векторных диаграмм векторы удобно располагать для начального момента времени ($t = 0$). В этом случае векторы синусоид ЭДС e_1 и e_2 (рис. 4.2) расположены, как показано на рисунке 4.5, а, а векторы синусоид напряжения u и тока i (рис. 4.3) – как на рисунке 4.5, б.

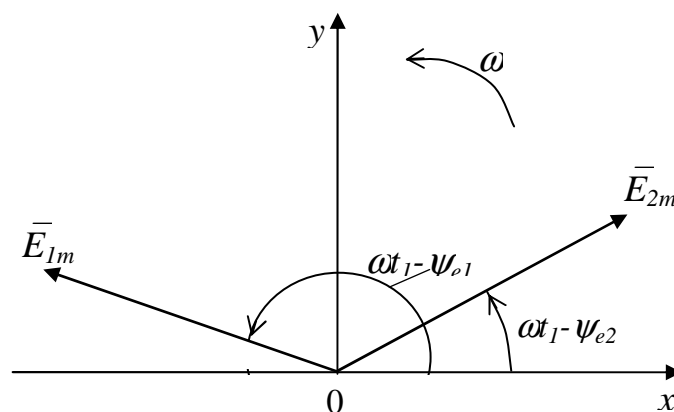


Рисунок 4.4 – Изображение синусоидальных ЭДС вращающимися векторами при $t = t_1$

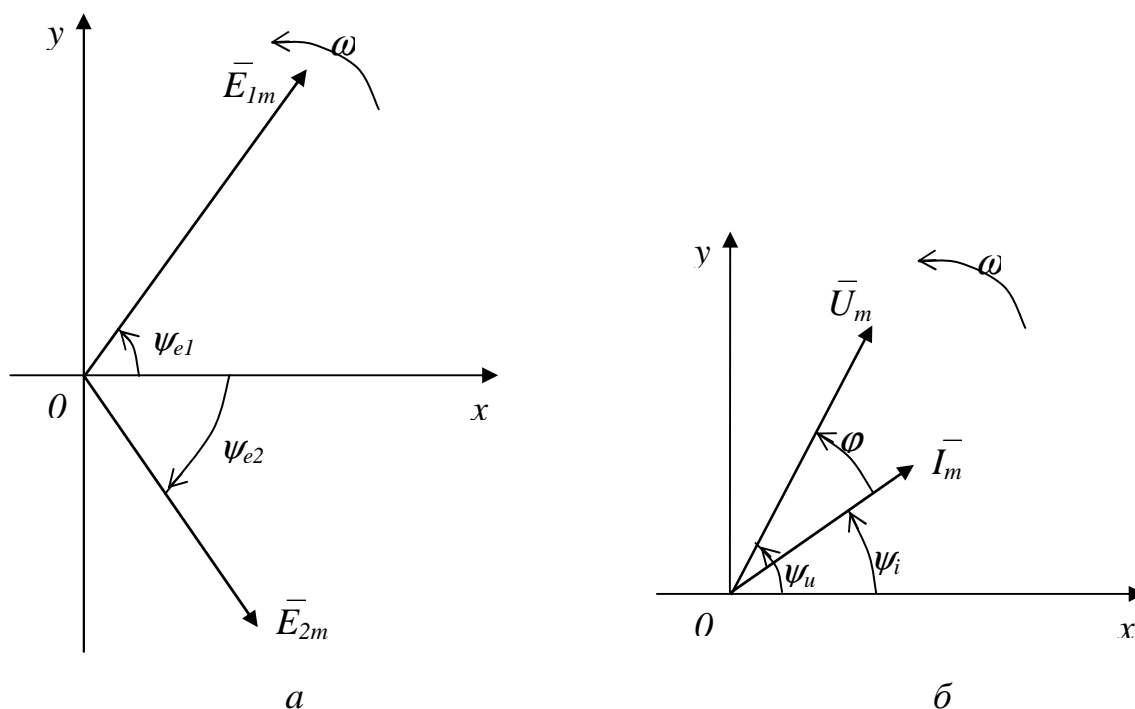


Рисунок 4.5 – Расположение векторов, изображающих синусоиды ЭДС, напряжения и тока для начального момента времени

Векторные диаграммы нашли широкое применение при анализе режимов работы цепей синусоидального тока. Их применение делает расчет цепи более наглядным и простым. Это упрощение заключается в том, что сложение и вычитание мгновенных значений величин можно заменить сложением и вычитанием их векторов.

Пусть, например, в точке разветвления цепи общий ток равен сумме токов i_1 и i_2 двух ветвей. Каждый из этих токов синусоидален и может быть

представлен уравнением

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1),$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

Результирующий ток также будет синусоидальным:

$$i_3 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2) = I_{3m} \sin(\omega t + \psi_3).$$

Определение амплитуды I_{3m} и начальной фазы ψ_3 этого тока путем соответствующих преобразований полученного уравнения громоздко и мало наглядно. Значительно проще это осуществить при помощи векторной диаграммы. На рисунке 4.6 изображены начальные положения векторов токов, проекции которых на ось ординат дают мгновенные значения токов для момента времени $t = 0$. При вращении этих векторов с одинаковой угловой скоростью ω их взаимное расположение не изменится и угол сдвига фаз между ними останется равным $\alpha = \psi_1 - \psi_2$.

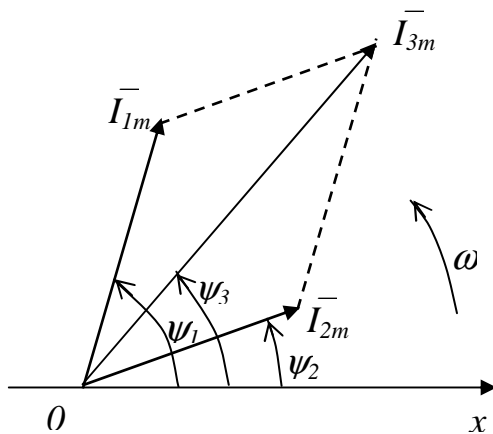


Рисунок 4.6 – Замена сложения мгновенных значений токов сложением изображающих их векторов

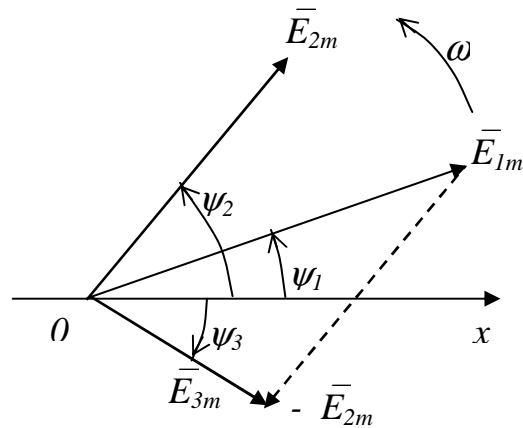


Рисунок 4.7 – Замена вычитания мгновенных значений ЭДС вычитанием изображающих их векторов

Так как алгебраическая сумма проекций векторов на ось ординат равна мгновенному значению общего тока, вектор общего тока равен геометрической сумме векторов токов:

$$\bar{I}_{3m} = \bar{I}_{1m} + \bar{I}_{2m}.$$

Построение векторной диаграммы в масштабе позволяет определить значения I_{3m} и ψ_3 из диаграммы.

Вычитание мгновенных значений, например, ЭДС $e_3 = e_1 - e_2$, где $e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ и $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$, можно заменить вычитанием изображающих их векторов $\bar{E}_{3m} = \bar{E}_{1m} - \bar{E}_{2m}$ как показано на рисунке 4.7. На диаграмме для определения амплитуды \bar{E}_{3m} результирующего вектора ЭДС к вектору \bar{E}_{1m} прибавлен обратный вектор $-\bar{E}_{2m}$. В соответствии с диаграммой результирующая ЭДС определяется уравнением

$$e_3 = E_{3m} \sin(\omega t - \psi_3).$$

4.5 Комплексная форма представления синусоидальных напряжений и токов

При расчетах электрических цепей с синусоидальными ЭДС, напряжениями и токами достаточно эффективным является комплексный метод анализа. При изображении вращающихся векторов синусоидальных величин на комплексной плоскости ось абсцисс плоскости декартовых координат совмещают с осью действительных или вещественных величин (ось $+1$) комплексной плоскости. Тогда мгновенные значения синусоидальных величин получают на оси мнимых величин (ось $+j$).

Для того чтобы представить синусоидальную ЭДС

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi), \quad (4.15)$$

с начальной фазой ψ , проведем на комплексной плоскости (рис. 4.8) из начала координат под углом ψ к оси действительных величин вектор, длина которого в масштабе построения равна амплитуде ЭДС E_m . Конец этого вектора находится в точке, которой соответствует определенное комплексное число – **комплексная амплитуда** ЭДС:

$$\dot{E}_m = E_m e^{j\psi} = E_m \angle \psi. \quad (4.16)$$

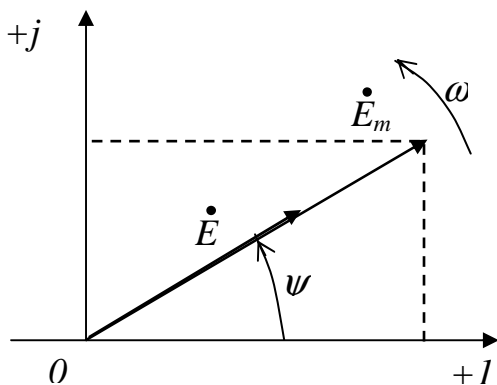


Рисунок 4.8 – Изображение синусоидальной ЭДС вращающимся вектором на комплексной плоскости

При увеличении во времени фазы ЭДС $\omega t + \psi$ угол между вектором и осью действительных величин растет, т. е. получается вращающийся вектор

$$E_m e^{j(\omega t + \psi)} = E_m \cos(\omega t + \psi) + j E_m \sin(\omega t + \psi).$$

Как видим, мнимая часть вращающегося вектора равна заданной синусоидальной ЭДС.

Вектор на комплексной плоскости, длина которого в масштабе построения равна действующему значению синусоидальной ЭДС, называется **комплексным действующим значением синусоидальной ЭДС**

$$\dot{E} = \frac{\dot{E}_m}{\sqrt{2}} = E e^{j\psi} = E \angle \psi. \quad (4.17)$$

Так же обозначается и сам вектор на комплексной плоскости (рис. 4.8).

Используются три формы записи комплексного значения синусоидальных ЭДС, токов и мощностей. Рассмотрим их на примере синусоидальной ЭДС.

Алгебраическая форма записи $\dot{E} = \text{Re } \dot{E} + j \text{Im } \dot{E}$, или в другом обозначении $\dot{E} = E' + jE''$, где $E' = \text{Re } \dot{E} = E \cos \psi$ и $E'' = \text{Im } \dot{E} = E \sin \psi$ – действительная и мнимая составляющие комплексного значения синусоидальной ЭДС

$$E = \sqrt{(\text{Re } \dot{E})^2 + (\text{Im } \dot{E})^2}; \quad \psi = \arctg \frac{\text{Im } \dot{E}}{\text{Re } \dot{E}}.$$

Алгебраическая форма записи более удобна при сложении и вычитании комплексных чисел.

Тригонометрическая форма записи является производной от алгебраической и удобна при переходе от показательной к алгебраической форме записи. С учетом того, что $\cos \psi = E'/E$, $\sin \psi = E''/E$ тригонометрическая форма записи имеет вид $\dot{E} = E \cos \psi + jE \sin \psi$.

Показательная форма записи является производной от тригонометрической и имеет вид $\dot{E} = E e^{j\psi} = E \angle \psi$. Эта форма записи более удобна при умножении, делении, извлечении корней из комплексных чисел.

Переход от показательной формы записи синусоидальных величин к тригонометрической выполняется с помощью формулы Эйлера

$$e^{j\psi} = \cos \psi + j \sin \psi.$$

Таким образом, если задано мгновенное значение напряжения (или тока) в виде синусоиды $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$, то комплексную амплитуду записывают сначала в показательной форме, а затем по формуле Эйлера переходят к алгебраической форме.

При анализе цепей синусоидального тока применяют главным образом комплексные действующие значения синусоидальных величин, сокращенно их называют **комплексными значениями**, а соответствующие векторы на комплексной плоскости – **векторами комплексных значений**.

Пользуясь векторной диаграммой, сложение и вычитание комплексных значений можно заменить сложением и вычитанием соответствующих векторов. Это упрощает расчеты и делает их наглядными.

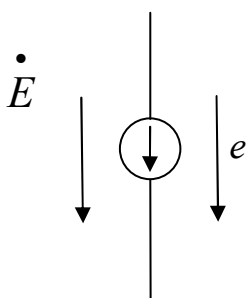


Рисунок 4.9 – Выбор положительного направления синусоидальной ЭДС

Направление синусоидальных величин (ток, напряжение) в цепи периодически изменяется, но одно из двух направлений принимается положительным. Это направление выбирается произвольно и показывается стрелкой на схеме соответствующего участка цепи. При выбранном положительном направлении синусоидальная величина представляется мгновенным значением (например, для напряжения $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$)

и соответствующим комплексным значением ($\dot{E} = E \angle \psi$ - см. рис. 4.9.). Следовательно, взаимно однозначному представлению синусоидальных токов, напряжений и других величин в виде мгновенных и комплексных значений соответствуют их одинаковые положительные направления (рис. 4.9).

Применение комплексных чисел позволяет от геометрического сложения или вычитания векторов на векторной диаграмме перейти к алгебраическому действию над комплексными числами этих векторов. Например, для определения комплексной амплитуды результирующего тока (см. рис. 4.6) достаточно сложить два комплексных числа, соответствующих комплексным амплитудам складываемых токов:

$$\dot{I}_{3m} = \dot{I}_{1m} + \dot{I}_{2m} = \dot{I}_{3m} e^{j\psi_3}.$$

Для определения комплексной амплитуды результирующей ЭДС (см. рис. 4.7) достаточно определить разность комплексных чисел, соответствующих комплексным амплитудам ЭДС \dot{E}_{1m} и \dot{E}_{2m}

$$\dot{E}_{3m} = \dot{E}_{1m} - \dot{E}_{2m} = \dot{E}_{3m} e^{-j\psi_3}.$$

4.6 Действующие и средние значения синусоидальных напряжений и токов

Для определения действующего значения синусоидального тока воспользуемся формулой (4.9), подставив в нее вместо мгновенных значений синусоидального тока его выражение

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}.$$

Так как

$$\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{I_m^2}{2} T,$$

то действующее значение синусоидального тока меньше его амплитуды в $\sqrt{2}$ раз:

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m. \quad (4.18)$$

Аналогично определяют действующие значения синусоидальных напряжений и ЭДС:

$$U = U_m / \sqrt{2} \quad \text{и} \quad E = E_m / \sqrt{2}. \quad (4.19)$$

Шкалы электроизмерительных приборов, применяемых для измерения синусоидальных токов и напряжений, проградуированы в действующ-

щих значениях, и для определения амплитуд синусоидальных величин их показания достаточно увеличить в $\sqrt{2}$ раз.

Под средним значением синусоидальных токов понимают их средние значения за полупериод. Если ток $i = I_m \sin \omega t$, то его среднее значение

$$I_{cp} = \frac{\int_0^T i dt}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^T I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m, \quad (4.20)$$

Следовательно, среднее значение синусоидального тока составляет $2/\pi$ его амплитудного значения. Аналогично определяют средние значения синусоидальных напряжения и ЭДС:

$$U_{cp} = \frac{2}{\pi} U_m, \quad E_{cp} = \frac{2}{\pi} E_m.$$

Среднее значение тока измеряется приборами магнитоэлектрической системы (см. подраздел 7.4), измерительная цепь которых содержит выпрямитель тока.

4.7 Комплексная форма записи законов Кирхгофа

В общем случае в соответствии с первым законом Кирхгофа в комплексной форме алгебраическая сумма комплексных значений токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n \dot{I}_k = \sum_{k=1}^n I'_k + j \sum_{k=1}^n I''_k = 0, \quad (4.21)$$

где \dot{I}_k - комплексное значение тока в k -й ветви имеет две формы записи:

$$\dot{I}_k = I'_k + j I''_k \quad \text{и} \quad \dot{I}_k = I_{ak} + j I_{pk},$$

где $I'_k = I_{ak}$ - активная составляющая тока k -й ветви (в теории комплексных чисел – действительная составляющая);

$I''_k = I_{pk}$ - реактивная составляющая тока k -й ветви (в теории комплексных чисел – мнимая составляющая);

n – число ветвей, сходящихся в узле.

Согласно второму закону Кирхгофа для любого замкнутого контура алгебраическая сумма комплексных значений падений напряжений на его участках равна алгебраической сумме комплексных значений ЭДС, действующих в контуре:

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k = \sum_{k=1}^m \dot{E}_k, \quad (4.22)$$

где \dot{U}_k - комплексное значение падения напряжения на k -м участке контура;
 \dot{E}_k - комплексное значение ЭДС k -го участка контура;
 n - число участков с пассивными элементами;
 m - число участков с ЭДС.

Для напряжений и ЭДС, как и в случае с комплексными токами, имеют место две формы записи

$$\dot{U}_k = U'_k + jU''_k = U_{ak} + jU_{pk}, \quad (4.23)$$

$$\dot{E}_k = E'_k + jE''_k = E_{ak} + jE_{pk}, \quad (4.24)$$

где $U'_k = U_{ak}$ и $E'_k = E_{ak}$ - активная составляющая падения напряжения и ЭДС в k -й ветви (в теории комплексных чисел – действительная составляющая);

$U''_k = U_{pk}$, $E''_k = E_{pk}$ - реактивная составляющая падения напряжения и ЭДС в k -й ветви (в теории комплексных чисел – мнимая составляющая).

Правило знаков при комплексной форме записи уравнений по законам Кирхгофа сохраняется таким же, как и в цепях постоянного тока.

Рассмотрим запись законов Кирхгофа на примере схемы электрической цепи (рис. 4.10, а), в которой действуют синусоидальные ЭДС, мгновенные значения которых заданы уравнениями:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1),$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

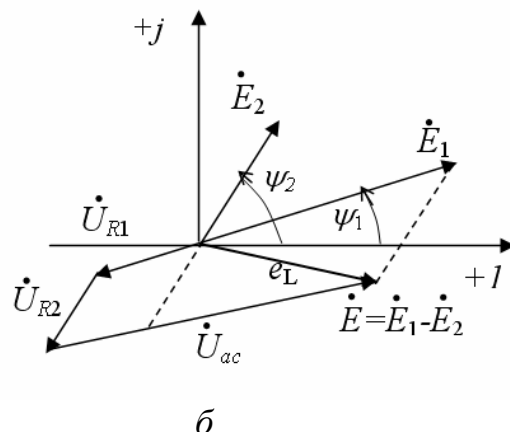
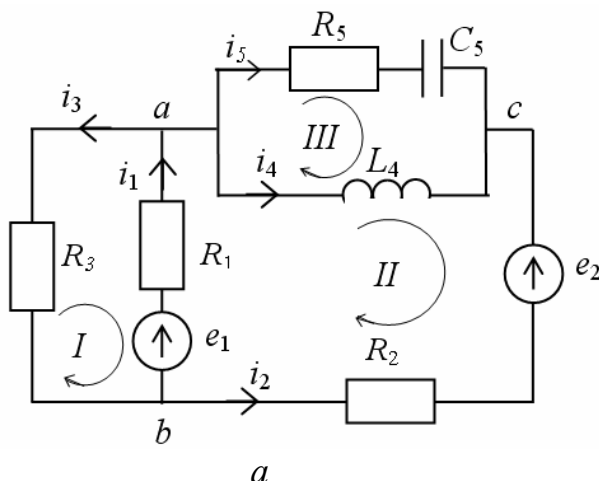


Рисунок 4.10 – Схема электрической сети переменного тока (а) и векторная диаграмма ЭДС и напряжений II-го контура (б)

Под действием этих ЭДС во всех ветвях цепи появятся синусоидальные токи, и на отдельных участках ее возникнут синусоидальные падения напряжения.

Для определения токов данной схемы при заданных значениях ЭДС e_1 и e_2 и сопротивлений (резистивных $R_1 - R_5$, индуктивного L_4 и емкостного C_5) по законам Кирхгофа нужно составить систему из пяти уравнений. Порядок составления уравнений тот же, что и в случае постоянного тока (см. подраздел 2.7).

Уравнения, составленные для узлов a и b в соответствии с первым законом Кирхгофа будут иметь вид:

$$\text{для узла } a: \quad \dot{I}_1 - \dot{I}_3 - \dot{I}_4 - \dot{I}_5 = 0, \quad (4.25)$$

$$\text{для узла } b: \quad -\dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0. \quad (4.26)$$

Уравнения, составленные для контуров I , II и III в соответствии со вторым законом Кирхгофа при задании обхода контуров по часовой стрелке, будут иметь вид:

$$\text{для контура } I: \quad -R_1 \dot{I}_1 + R_3 \dot{I}_3 = -\dot{E}_1, \quad (4.27)$$

$$\text{для контура } II: \quad R_1 \dot{I}_1 + jX_4 \dot{I}_4 - R_2 \dot{I}_2 = \dot{E}_1 - \dot{E}_2, \quad (4.28)$$

$$\text{для контура } III: \quad (R_5 - jX_5) \dot{I}_5 - jX_4 \dot{I}_4 = 0. \quad (4.29)$$

Таким образом, полученные уравнения (4.25)–(4.29), представляют собой законы Кирхгофа, записанные в комплексной форме для схемы электрической сети в соответствии с рисунком 4.10, a .

На рисунке 4.10, b в качестве примера показана векторная диаграмма ЭДС и напряжений контура II , которая наглядно иллюстрирует второй закон Кирхгофа в комплексной форме.

Выводы

1. В силу ряда преимуществ по технико-экономическим показателям переменный (синусоидальный) ток получил большее распространение по сравнению с постоянным током.

2. В электрических цепях переменного тока, в отличие от цепей постоянного тока, индуктивный и емкостной элементы оказывают влияние на режим работы цепи.

3. Для оценки действующего значения переменного тока производят сравнение эффекта от его прохождения через элемент схемы с аналогичным эффектом при прохождении через этот элемент постоянного тока.

4. Среднее значение переменного (синусоидального) тока определяется за половину его периода.

5. Синусоидальные токи и напряжения могут быть представлены в виде тригонометрических функций, в виде графиков изменения во времени, в виде вращающихся векторов и в виде комплексных чисел.

6. Комплексные значения синусоидальных токов и напряжений могут быть представлены в показательной форме, тригонометрической форме и алгебраической форме.

7. Применение комплексных чисел для анализа электрических цепей переменного тока позволяет упростить расчеты и сделать их более наглядными.

Вопросы для самопроверки

1. Какой электрический ток считается переменным током? Периодическим током?

2. Назовите причины широкого распространения переменного тока.

3. Какая частота переменного тока получила наибольшее распространение?

4. Дайте характеристику резистивного, индуктивного и емкостного элементов электрической цепи.

5. Поясните, в чем заключается явление индуктивности.

6. Поясните различия физических процессов в индуктивном элементе при прохождении через него постоянного и переменного тока.

7. В каких единицах измеряется индуктивность?

8. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.

9. Поясните явления взаимной индукции и самоиндукции.

10. Охарактеризуйте свойства емкостного элемента схемы замещения.

11. В чем отличие физических процессов в емкостном элементе при его работе в цепях постоянного и переменного тока?

12. Поясните, что понимают под действующим значением периодического тока? Напряжения?

13. Поясните, что понимают под средним значением периодического синусоидального тока? Напряжения?

14. Объясните параметры синусоидального тока и синусоидального напряжения.

15. Поясните, что понимают под фазой синусоидального тока или напряжения.

16. Поясните, что понимают под углом сдвига фаз.

17. Какие формы используют для представления векторов синусоид ЭДС, токов и напряжений?

18. Поясните, что представляет собой векторная диаграмма. В чем ее преимущество при анализе электрической цепи?

19. Какие формы записи комплексных значений синусоидальных токов применяются на практике?

20. Запишите выражение для переменного напряжения в комплексной форме и поясните его составляющие.

21. Для чего используется формула Эйлера?

22. Запишите выражение для переменного напряжения в показательной и тригонометрической формах и поясните составляющие.

5 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ключевые понятия: сопротивление (активное, индуктивное, емкостное), комплексное сопротивление (полное, активное, реактивное, индуктивное, емкостное), мощность активная (реактивная, полная), треугольник сопротивлений, резонанс напряжений, проводимость активная (реактивная, полная), активная и реактивная составляющие тока, резонанс токов, коэффициент мощности.

5.1 Электрическая цепь с резистивным элементом

Предположим, что на вход цепи с резистивным элементом, имеющим *активное сопротивление* R (рис. 5.1, а), подано синусоидальное напряжение

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u). \quad (5.1)$$

Необходимо установить, как будут изменяться ток и мощность этой цепи.

Ток в цепи можно определить, пользуясь законом Ома для мгновенных значений:

$$i = u/R = U_m \sin(\omega t + \psi_u)/R,$$

или
$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad \psi_i = \psi_u, \quad (5.2)$$

Из сопоставления уравнения (5.2) с (5.1) видим, что синусоида тока имеет ту же частоту, что и синусоида напряжения и совпадает с ней по фазе.

Амплитуда тока связана с амплитудой напряжения соотношением

$$I_m = U_m/R. \quad (5.3)$$

Если левую и правую части выражения (5.3) разделить на $\sqrt{2}$, то получим новую формулу для действующих значений тока и напряжения

$$I = U/R, \quad (5.4)$$

выражающую закон Ома для цепи с резистивным элементом. Согласно этому закону действующее значение тока в цепи с резистивным элементом равно действующему значению напряжения, деленному на активное сопротивление элемента.

Мгновенное значение мощности этой цепи равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u) = U_m I_m \frac{1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)}{2},$$

или
$$P = I \cdot U \cos(\omega t + \psi_u). \quad (5.5)$$

Среднее за период значение мощности

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T dt - \frac{1}{T} UI \int_0^T \cos 2(\omega t + \psi_u) dt ,$$

или

$$P = I \cdot U.$$

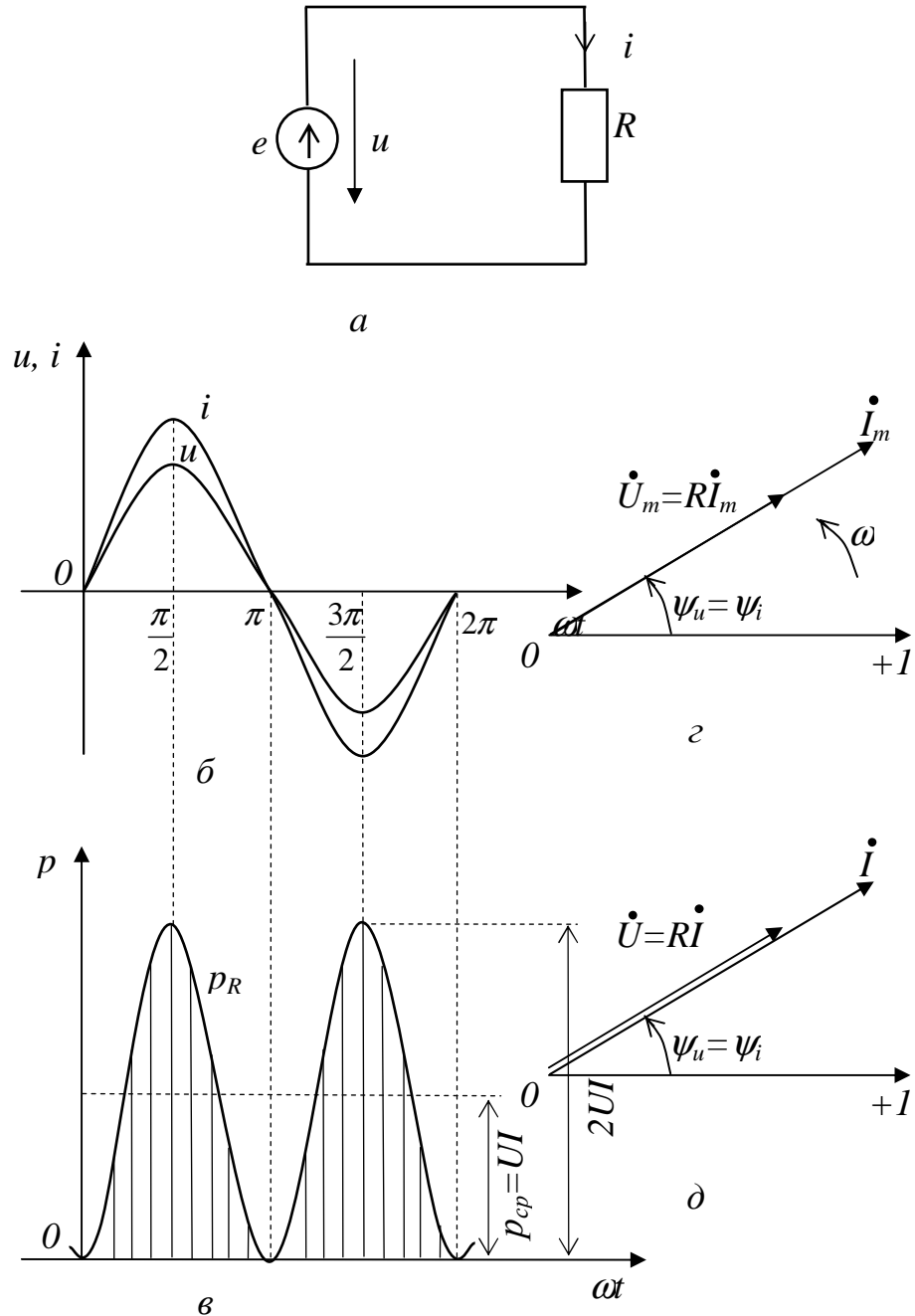


Рисунок 5.1 – Цепь с резистивным элементом:
 а – схема; б – графики мгновенных значений напряжения и тока;
 в – графики мгновенных значений мощности; г – векторные
 диаграммы комплексных амплитуд; д – векторные диаграммы
 комплексных значений тока и напряжения

Если в выражение для средней мощности вместо напряжения подставить его значение $U = R \cdot I$ из (5.4), то получим, **что среднее значение мощности в цепи равно активной мощности этой цепи.**

$$P = I \cdot U = R \cdot I^2. \quad (5.6)$$

Для иллюстрации изменений напряжения, тока и мощности в резисторе на рисунках 5.1, б и 5.1, в по уравнениям (5.1), (5.2) и (5.5) построены графики p , u и i для случая, когда начальная фаза $\psi_u = 0$.

Из графиков видно, что мгновенная мощность в резисторе пульсирует от нуля до $2P = 2U \cdot I$, оставаясь все время положительной. Это означает, что **при любом направлении тока в резистивном элементе энергия поступает от источника в цепь и превращается в тепловую энергию**. Величину преобразованной энергии за период можно характеризовать заштрихованной площадью, ограниченной кривой мощности и осью абсцисс.

Для построения векторной диаграммы напряжения и тока цепи на комплексной плоскости запишем их комплексные амплитуды в соответствии с уравнениями (5.1) и (5.2):

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}, \quad \dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m e^{j\psi_u}. \quad (5.7)$$

Но амплитуду напряжения из формулы (5.3) можно выразить через амплитуду тока, поэтому комплексную амплитуду напряжения можно записать по-другому:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = R \cdot I_m e^{j\psi_u} = R \cdot \dot{I}_m. \quad (5.8)$$

Из выражения (5.8) следует, что вектор, изображающий синусоиду напряжения на резисторе, совпадает по направлению с вектором, изображающим синусоиду тока. Векторная диаграмма комплексных амплитуд напряжения и тока построена на рисунке 5.1, з.

Однако при расчете цепей синусоидального тока вместо векторов комплексных амплитуд принято строить векторы комплексных действующих значений напряжения \dot{U} и тока \dot{I} . Эти векторы соответственно совпадают по направлению с векторами \dot{U}_m и \dot{I}_m и отличаются от них только по величине:

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi_u}, \quad \dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}} = R \cdot I e^{j\psi_u} = R \cdot \dot{I}. \quad (5.9)$$

На рисунке 5.1, д построена векторная диаграмма комплексных значений напряжения и тока резистивного элемента. Из диаграммы следует, что **вектор напряжения на резисторе совпадает по направлению с вектором тока и равен комплексному значению тока, умноженному на активное сопротивление резистора**.

Из (5.9) можно получить выражение

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R}, \quad (5.10)$$

определяющее закон Ома в комплексной форме для цепи с резистивным элементом. Согласно этому закону **комплексное значение тока в цепи с резистором равно комплексному значению напряжения, деленному на активное сопротивление резистора.**

5.2 Электрическая цепь с идеальной индуктивной катушкой

Предположим, что в катушке с индуктивностью L , активное сопротивление которой весьма мало ($R \approx 0$), имеется синусоидальный ток (рис. 5.2, а)

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (5.11)$$

который наводит в ней ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = E_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}), \quad (5.12)$$

где $E_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m$ – амплитуда синусоидальной ЭДС.

Из (5.11) и (5.12) следует, что синусоида ЭДС самоиндукции отстает по фазе от синусоиды тока на угол сдвига фаз $\pi/2$.

Внешнее напряжение источника $u = u_L$ уравнивается ЭДС самоиндукции e_L . Синусоида этого напряжения

$$u = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}). \quad (5.13)$$

Из (5.13) видно, что синусоида напряжения идеальной катушки опережает по фазе синусоиду тока на угол сдвига фаз $\pi/2$.

Амплитуда синусоиды напряжения на катушке

$$U_{Lm} = \omega \cdot L \cdot I_m. \quad (5.14)$$

Действующее значение этого напряжения

$$U_L = \omega \cdot L \cdot I. \quad (5.15)$$

Комплексные амплитуды тока и напряжения:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i},$$

$$\dot{U}_{Lm} = U_{Lm} e^{j(\psi_i + \pi/2)} = \omega L I_m e^{j\psi_i} e^{j\pi/2} = \omega L \dot{I}_m,$$

или

$$\dot{U}_{Lm} = j \omega L \dot{I}_m.$$

Комплексные значения тока и напряжения катушки

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i}, \quad \dot{U}_L = j\omega L \dot{I}. \quad (5.16)$$

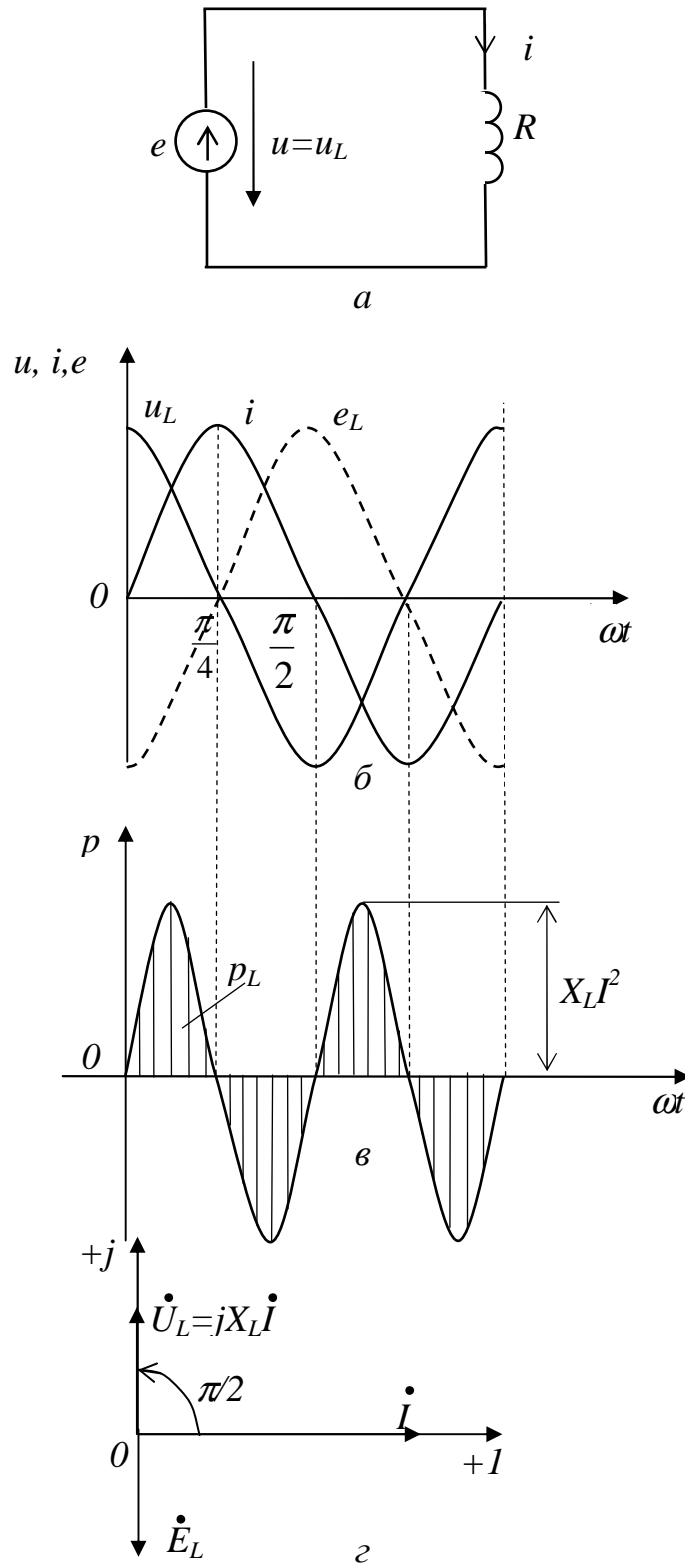


Рисунок 5.2 – Схема (а), графики мгновенных значений (б, в) и векторная диаграмма (з) цепи с идеальной катушкой

На рисунке 5.2, б приведены графики синусоид напряжения u_L , тока i и ЭДС самоиндукции e_L , а на рисунке 5.2, в – соответствующие этим синусоидам векторы их комплексных значений \dot{U}_L , \dot{I} и \dot{E}_L для случая $\psi_i = 0$.

Произведение ωL имеет размерность сопротивления:

$$[\omega L] = 1/\text{с} \cdot \text{Гн} = 1/\text{с} \cdot \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Ом}.$$

Его обозначают X_L и называют индуктивным сопротивлением катушки:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L. \quad (5.17)$$

Величину $j\omega L = jX_L$ называют **комплексным индуктивным сопротивлением идеальной катушки** или **комплексом индуктивного сопротивления**.

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально индуктивности катушки и частоте тока в ней.

Согласно выражению (5.15) действующее значение напряжения на катушке U_L равно действующему значению тока I , умноженному на индуктивное сопротивление катушки.

Из уравнений (5.16) видно, что **вектор напряжения на идеальной катушке опережает по фазе вектор тока на угол сдвига фаз $\pi/2$** .

Из уравнений (5.16) можно получить также формулу для комплексного значения тока

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_L}{j\omega L} = \frac{\dot{U}_L}{jX_L}, \quad (5.18)$$

которая выражает закон Ома в комплексной форме для цепи с идеальной индуктивной катушкой. Таким образом, в соответствии с законом Ома комплексное значение тока \dot{I} в цепи с идеальной катушкой равно комплексному значению напряжения \dot{U}_L на катушке, деленному на комплексное значение индуктивного сопротивления катушки jX_L .

Мгновенное значение мощности в цепи с идеальной катушкой

$$\begin{aligned} p_L &= u_L i = U_{Lm} I_m \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) \sin(\omega t + \psi_i) = \\ &= U_{Lm} I_m \frac{1}{2} [\cos(+\pi/2) - \cos(2\omega t + 2\psi_i + \pi/2)] = \\ &= -U_L I \cos(2\omega t + 2\psi_i + \pi/2), \end{aligned}$$

или
$$p_L = U_L I \sin(2\omega t + 2\psi_i). \quad (5.19)$$

График этой мощности для случая $\psi_i = 0$ приведен на рисунке 5.2, в.

В первую четверть периода, когда ток и напряжение положительны, мощность также положительна. Энергия $W_L = L \cdot i^2/2$ от источника переходит

дит в цепь и затрачивается на создание магнитного поля. К концу первой четверти периода поле имеет максимальную энергию $L \cdot I_m^2 / 2$, пропорциональную заштрихованной площади, ограниченной осью абсцисс и первой полувольтной синусоиды мощности.

Во вторую четверть периода ток i убывает, но остается положительным. Напряжение u_L и мощность p_L отрицательны. Энергия магнитного поля возвращается обратно в источник. К концу второй четверти периода весь запас энергии $L \cdot I_m^2 / 2$ будет возвращен источнику. Поэтому среднее за период значение мощности цепи с идеальной катушкой равно нулю:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T p_L dt = 0.$$

Таким образом, в цепи с идеальной катушкой происходят непрерывные колебания (обмен) энергии между источником и магнитным полем катушки без затраты энергии источника.

По аналогии с активной мощностью в цепи с идеальным резистором, в цепи с идеальной катушкой вводится понятие **реактивной индуктивной мощности**

$$Q_L = U_L \cdot I = X_L \cdot I^2. \quad (5.20)$$

Реактивная индуктивная мощность имеет ту же размерность, что и активная мощность. Но с целью удобства для единиц измерения реактивной мощности принято другое наименование – вольт-ампер реактивный (ВАр).

5.3 Электрическая цепь с идеальным конденсатором

Пусть к конденсатору (рис. 5.3, а), диэлектрик которого идеален и не имеет потерь энергии, подведено синусоидальное напряжение

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u). \quad (5.21)$$

Ток в конденсаторе равен (4.7)

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \omega \cdot C \cdot U_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u),$$

$$\text{или} \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2), \quad (5.22)$$

где I_m - амплитуда тока

$$I_m = \omega \cdot C \cdot U_{Cm}. \quad (5.23)$$

Действующее значение тока

$$I = \omega \cdot C \cdot U_c = \frac{U_c}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = \frac{U_c}{X_C}. \quad (5.24)$$

Величина

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (5.25)$$

имеет размерность сопротивления

$$[X_c] = \frac{c \cdot B}{Kl} = \frac{B \cdot c}{A \cdot c} = O_m,$$

и называется **реактивным сопротивлением конденсатора** или просто **емкостным сопротивлением**.

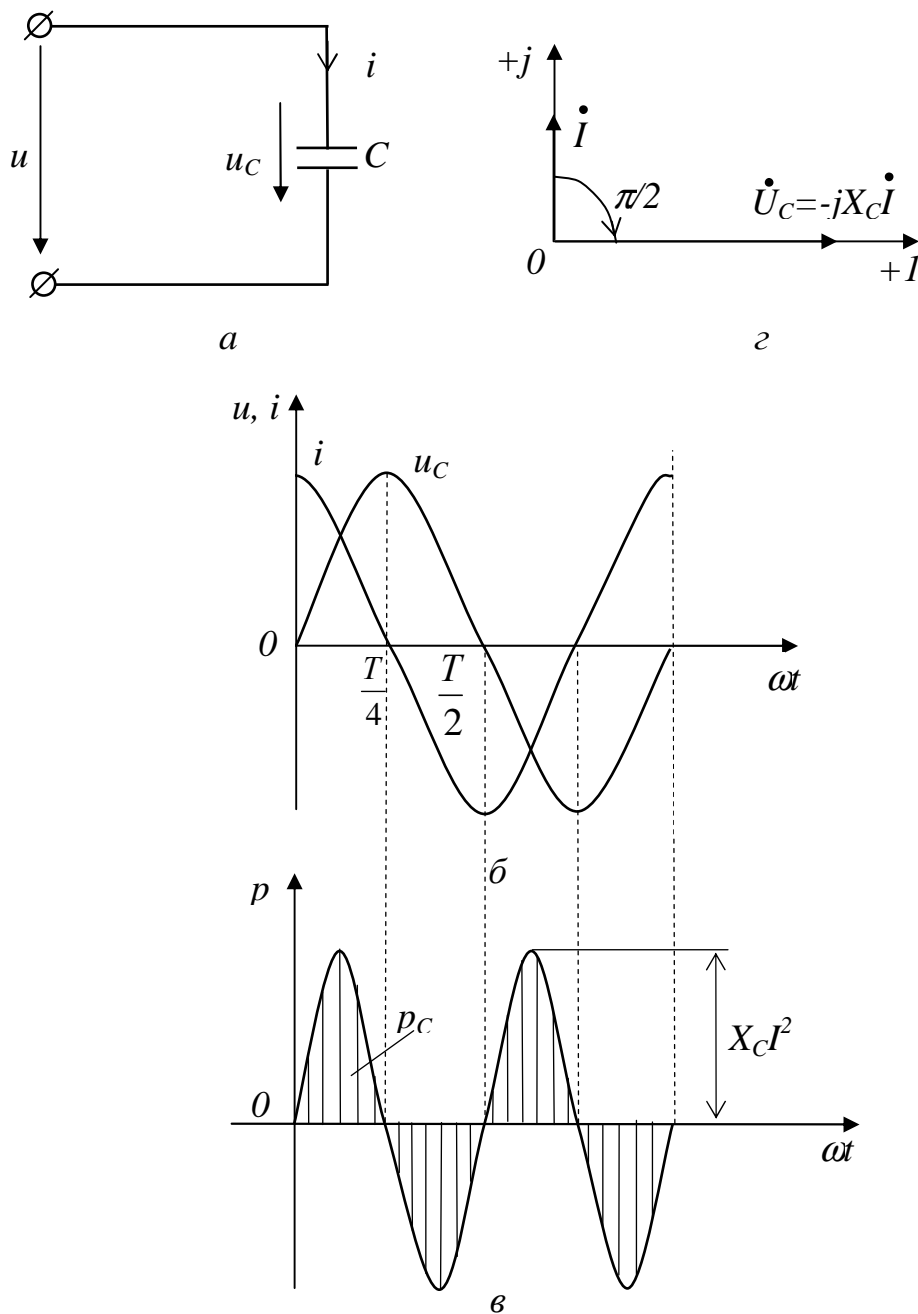


Рисунок 5.3 – Схема (а), графики мгновенных значений (б, в) и векторная диаграмма (г) цепи с идеальным конденсатором

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте источника питания и емкости конденсатора.

Сопоставляя уравнения (5.21) и (5.22), видим, что **синусоида емкостного тока опережает по фазе синусоиду напряжения на конденсаторе на угол сдвига фаз $\pi/2$** .

По уравнениям (5.21) и (5.22) на рисунке 5.3, б построены графики i , u_c , а на рисунке 5.3, в - векторы действующих значений тока и напряжения на конденсаторе для случая, когда начальная фаза $\psi_u = 0$.

Комплексные амплитуды напряжения и тока, соответствующие уравнениям (5.21) и (5.22), равны:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Cm} &= U_{Cm} e^{j\psi_u}, \\ \dot{I}_m &= I_m e^{j(\psi_u + 90^\circ)} = \frac{U_{Cm} e^{j\psi_u}}{X_C} e^{j90^\circ} = j \frac{U_{Cm} e^{j\psi_u}}{X_C} = j \frac{\dot{U}_{Cm}}{X_C} = \frac{\dot{U}_{Cm}}{-jX_C}.\end{aligned}$$

Разделив правую и левую части последнего выражения на $\sqrt{2}$, получим уравнение, связывающее комплексные значения тока и напряжения:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_C}{-jX_C}, \quad (5.26)$$

где jX_C – комплекс емкостного сопротивления.

Уравнение (5.26) выражает закон Ома в комплексной форме для участка цепи с идеальным конденсатором: комплекс тока конденсатора равен комплексу напряжения, деленному на комплекс емкостного сопротивления конденсатора.

Напряжение на конденсаторе, определенное из формулы (5.26), равно произведению его тока и комплекса емкостного сопротивления:

$$\dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}. \quad (5.27)$$

Из уравнения (5.27) или из векторной диаграммы (рис. 5.3, в) следует, что **вектор напряжения на идеальном конденсаторе отстает по фазе от вектора тока на угол сдвига фаз $\pi/2$** .

Мгновенное значение мощности

$$p_C = u_C i = U_{Cm} I_m \sin(\omega t + \psi_u) \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2),$$

$$\text{или} \quad p_C = U_C I \sin 2(\omega t + \psi_u). \quad (5.28)$$

Среднее за период значение мощности цепи с идеальным конденсатором равно нулю:

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^T p_C dt = 0. \quad (5.29)$$

Как и в цепи с идеальной катушкой, здесь наблюдаются процессы колебания энергии $W_c = C \cdot u_c^2 / 2$ и чередования промежутков времени, в течение которых энергия от источника запасается в электрическом поле конденсатора, с промежутками времени, когда энергия из цепи возвращается обратно к источнику. Для иллюстрации этих процессов на рисунке 5.3, в построен график изменения мощности в цепи для случая $\psi_c = 0$. Сопоставляя его с графиками изменения напряжения и тока в цепи, видим, что в первую четверть периода значения u_c , i и p_c положительны, конденсатор заряжается. В это время имеет место накопление энергии в электрическом поле конденсатора за счет энергии, поступающей от источника питания. К концу первой четверти периода поле запасает максимальную энергию $C \cdot U_{Cm}^2 / 2$. В течение второй четверти периода напряжение u_c убывает, конденсатор разряжается. Ток i и мощность p_c отрицательны. Энергия от поля возвращается обратно к источнику.

Амплитуду колебания мощности в цепи с конденсатором называют **реактивной емкостной мощностью** и обозначают Q_c . Согласно уравнению (5.28) значение этой мощности

$$Q_c = U_c \cdot I = X_c \cdot I^2. \quad (5.29)$$

Как и реактивная индуктивная мощность, реактивная емкостная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (ВАр).

5.4 Электрическая цепь с реальной индуктивной катушкой

Пусть в реальной индуктивной катушке с индуктивностью L и активным сопротивлением R (схема замещения представлена на рисунке 5.4, а) протекает ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \quad (5.30)$$

Определим закон изменения напряжения u на ее зажимах.

Мгновенное значение напряжения u запишем исходя из второго закона Кирхгофа

$$u = u_R + u_L = R \cdot i + L \cdot di/dt, \quad (5.31)$$

где u_R , u_L - напряжения на резистивном и индуктивном элементах катушки (рис. 5.4, а), соответственно.

В подразделах 5.1 и 5.2 было показано, что каждое из напряжений u_R и u_L является синусоидальным и имеет частоту, равную частоте тока i . Поэтому напряжение u является так же синусоидальным. Предположим, что оно может быть записано уравнением

$$u = U_m \sin(\omega t \pm \psi_u). \quad (5.32)$$

Амплитуду U_m и начальную фазу ψ_u напряжения u определим, пользуясь комплексным методом. Запишем уравнение (5.31) в комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L. \quad (5.33)$$

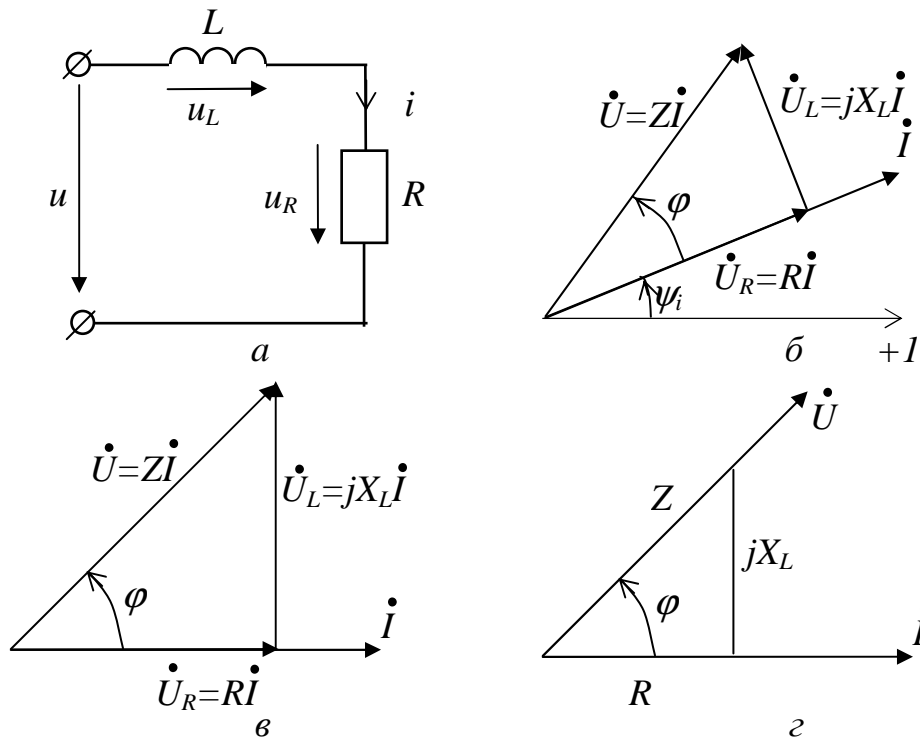


Рисунок 5.4 – Схема (а), треугольники напряжений и сопротивлений катушки с активным сопротивлением и индуктивностью (б, в, г)

Согласно уравнению (5.31) комплексное значение тока

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\psi_i}. \quad (5.34)$$

Тогда комплексные значения напряжений:

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} \text{ и } \dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I}.$$

Подставляя значения \dot{U}_R и \dot{U}_L в (5.33), получим уравнение для комплексного напряжения на входе схемы:

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} + jX_L \cdot \dot{I} = (R + jX_L) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I}. \quad (5.35)$$

Комплексная величина \underline{Z} , имеет размерность сопротивления и является коэффициентом пропорциональности между комплексными значениями напряжения и тока цепи. Поэтому $\underline{Z} = R + jX_L$ называют **комплексом полного сопротивления индуктивной катушки**. Действительной частью его является активное сопротивление R , а мнимой частью - комплекс индуктивного сопротивления катушки jX_L .

В формулах, в которые величина \underline{Z} входит или как множитель или как делитель, удобно пользоваться не алгебраической, а показательной формой ее записи:

$$\underline{Z} = R + jX_L = Z \cdot e^{j\varphi_L}, \quad (5.36)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ - модуль комплекса полного сопротивления индуктивной катушки, а $\varphi_L = \arctg X_L/R$ - его аргумент.

Следует обратить внимание на то, что обозначение комплексного сопротивления отличается от обозначения комплексов тока и напряжения – вместо точки над буквой символ комплексного сопротивления имеет черту снизу. Это различие объясняется тем, что сам комплекс \underline{Z} не служит изображением синусоидальной функции, а является комплексным числом, с помощью которого сопоставляются комплексные изображения тока и напряжения.

Подставляя в (5.35) значение Z из (5.36), а значение \dot{i} - из (5.34), получим

$$\dot{U} = Z e^{j\varphi_L} \cdot I e^{j\psi_i} = Z \cdot I e^{j(\psi_i + \varphi_L)} = U e^{j\psi_u}, \quad (5.37)$$

где

$$U = Z \cdot I, \quad \psi_u = \psi_i + \varphi_L. \quad (5.38)$$

Начальная фаза ψ_u положительна, поэтому в уравнении (5.32) она должна быть взята со знаком "плюс".

Зная значения U и ψ_u , уравнение (5.32) можно записать окончательно:

$$u = Z \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi_L). \quad (5.39)$$

Сопоставляя уравнения (5.39) и (5.30), видим, что синусоида напряжения на входе катушки опережает по фазе синусоиду тока на угол сдвига фаз $\varphi = \varphi_L$.

Из выражения (5.35) можно получить формулу закона Ома для индуктивной катушки в комплексной форме:

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}. \quad (5.40)$$

Согласно формуле (5.40) **комплекс тока в индуктивной катушке равен комплексу напряжения, деленному на комплекс полного сопротивления катушки.**

На рисунке 5.4, б приведена векторная диаграмма схемы рисунка 5.4, а.

При построении этой диаграммы за исходный взят вектор тока \dot{i} , расположенный под углом ψ_i к оси +1.

Вектор напряжения на резисторе $\dot{U} = R \cdot \dot{i}$ совпадает по фазе с вектором тока, а вектор напряжения на индуктивном элементе $\dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{i}$ опережает по фазе вектор тока на угол сдвига фаз $\pi/2$. Вектор напряжения \dot{U} равен геометрической сумме векторов: $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L$. Он опережает по фазе вектор тока на угол сдвига $\varphi = \varphi_L$.

Векторную диаграмму рисунка 5.4, б называют **треугольником напряжений**. Для упрощения диаграммы начальную фазу тока ψ_i полагают равной нулю, тогда вектор тока совпадает с осью +1, и треугольник напряжений располагается на плоскости, как показано на рисунке 5.4, в.

Если каждую из сторон треугольника напряжений (см. рис. 5.4, в) разделить на \dot{I} , то получим **треугольник комплексных сопротивлений** (рис. 5.4, г). Из этого рисунка видно, что модуль Z комплекса полного сопротивления \underline{Z} является гипотенузой прямоугольного треугольника комплексных сопротивлений, сторонами которого являются активное R и индуктивное jX_L сопротивления. Из него же можно определить угол сдвига фаз:

$$\cos \varphi_L = R/Z. \quad (5.41)$$

5.5 Мощность индуктивной катушки

С целью упрощения рассмотрения будем полагать, что начальная фаза тока в катушке (рис. 5.4, а) $\psi_i = 0$. Тогда мгновенное значение тока (5.30) может быть записано $i = I_m \sin \omega t$, а напряжение на индуктивной катушке - $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_L)$. На рисунке 5.5, а приведены графики мгновенных значений напряжения и тока этой катушки.

Мгновенное значение мощности равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$\begin{aligned} p &= u \cdot i = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi_L) \sin \omega t = \\ &= U_m \cdot I_m [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L)]/2. \end{aligned} \quad (5.45)$$

На рисунке 5.5, б приведен график мгновенного значения мощности, построенный по уравнению (5.45).

Среднее за период значение мощности

$$P_{cp} = P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{UI}{T} \int_0^T [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L)] dt,$$

или
$$P = U \cdot I \cos \varphi_L.$$

Так как $U = Z \cdot I$, а $\cos \varphi_L = R/Z$, то среднее значение мощности можно определить иначе:

$$P = U \cdot I \cos \varphi_L = Z \cdot I \cdot I \cdot R/Z = R \cdot I^2. \quad (5.46)$$

Из полученного соотношения видно, что **среднее значение мощности цепи равно ее активной мощности**.

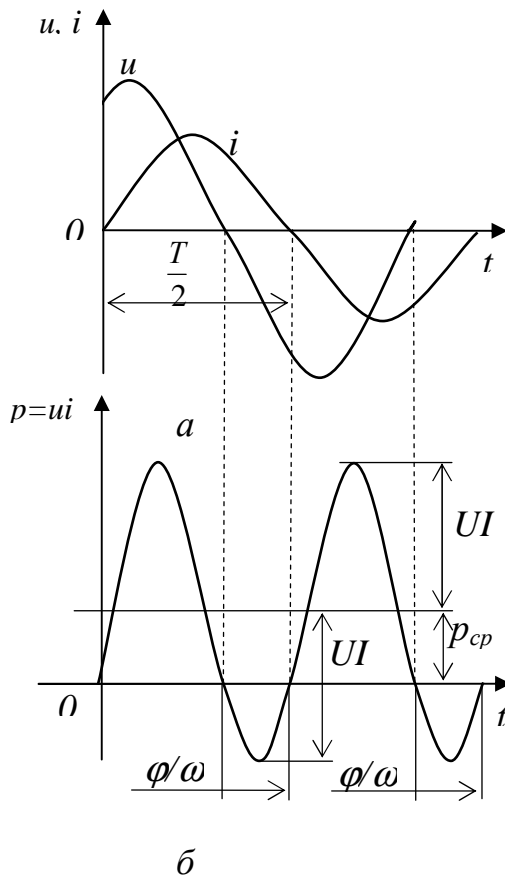


Рисунок 5.5 – Графики мгновенных значений напряжения, тока и мощности для схемы рисунка 5.4, а

Поэтому среднюю мощность цепи синусоидального тока обычно называют активной мощностью. **Активная мощность равна произведению действующих значений напряжения и тока на косинус угла сдвига фаз между ними.**

Наибольшее значение активной мощности, которое может быть получено при данных значениях напряжения и тока, называют **полной мощностью** и обозначают S .

Из уравнения (5.46) следует, что при $\cos \varphi = 1$ полная мощность

$$P_{max} = S = U \cdot I. \quad (5.47)$$

Величина

$$X_L \cdot I^2 = X_L \cdot I \cdot I = U_L \cdot I = U \cdot I \sin \varphi_L$$

является реактивной индуктивной мощностью цепи:

$$Q_L = X_L \cdot I^2 = U \cdot I \sin \varphi_L. \quad (5.48)$$

Активная, реактивная и полная мощность связаны соотношениями:

$$P^2 + Q_L^2 = (U \cdot I \cos \varphi_L)^2 + (U \cdot I \sin \varphi_L)^2 = (U \cdot I)^2 (\cos^2 \varphi_L + \sin^2 \varphi_L) = (U \cdot I)^2 = S,$$

или

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.49)$$

Хотя все три мощности цепи (активная, реактивная и полная) имеют одну и ту же размерность, для их различия введены единицы различных наименований: для активной мощности – ватты (Вт), для реактивной мощности – вольт-амперы реактивные (вар), для полной мощности – вольт-амперы (ВА).

Для выяснения значений каждой из мощностей вернемся к рассмотрению графиков мгновенных значений напряжения, тока и мощности, построенных на рисунке 5.5.

Для более подробного анализа энергетического процесса напряжение u представим активной и реактивной составляющими $u = u_R + u_L$ и подставим его в формулу для мгновенной мощности:

$$p = u \cdot i = (u_R + u_L) \cdot i = p_R + p_L.$$

Первое слагаемое представляет собой мгновенное значение активной мощности, график которой был построен на рисунке 5.1, б. Второе слагаемое является реактивной индуктивной мощностью, график которой также был построен ранее на рисунке 5.2, в. Для построения графиков этих мощностей на рисунке 5.6, а построена синусоида тока, перенесенная с рисунка 5.5, а и графики мощностей p_R и p_L , как на рисунках 5.1, в и 5.2, в. Суммированием ординат кривых p_R и p_L получена кривая результирующей мощности p , аналогичная кривой этой мощности на рисунке 5.5, б.

Из сопоставления графиков (рис. 5.6) видно, что в первую четверть периода ток положителен и возрастает. Все мощности p_R , p_L и p также положительны. Это означает, что в этот промежуток времени энергия источника расходуется на тепловую энергию и на энергию, запасаемую в магнитном поле катушки. К концу первой четверти периода магнитное поле запасает максимальную энергию $L \cdot I_m^2 / 2$.

Во вторую четверть периода ток убывает. Убывает также магнитное поле и запас энергии катушки. Часть энергии магнитного поля возвращается обратно источнику ($p_L < 0$).

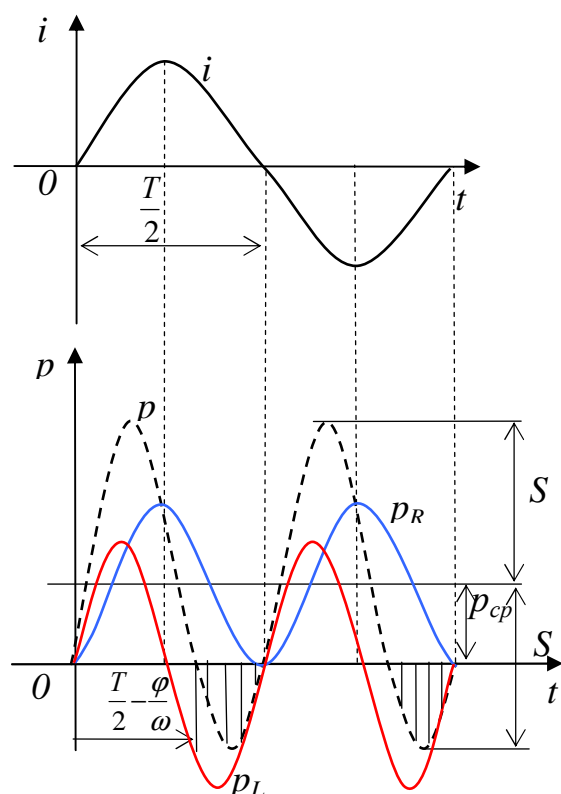


Рисунок 5.6 – Графики мгновенных значений тока, мощностей участков p_R , p_L и полной мощности p схемы рисунка 5.4, а

В течение времени от $t = T/4$ до $t = T/2 - \phi_L/\omega$ мощность источника p меньше активной мощности p_R . В это время часть энергии, которая рассеивается в виде тепловой энергии в резисторе R , частично поступает от источника и частично из магнитного поля. В момент времени $t = T/2 - \phi_L/\omega$ вся тепловая энергия покрывается за счет поступающей в цепь энергии из магнитного поля

$$(p = 0, p_R = p_L).$$

В течение времени от $t = T/2 - \phi_L/\omega$ до $t = T/2$ мощность $p_L < 0$, мощность $p_R > 0$, но ординаты кривой p_L численно равны сумме ординат кривых p и p_R . Это означает, что энергия, поступающая от магнитного поля обратно к источнику, частично расходуется на тепловую энергию, а частично возвращается обратно магнитному полю. В течение времени $\Delta t = \phi_L/\omega$ к источнику

возвратится энергия, равная заштрихованной на рисунке площади, ограниченной участком кривой p на этом отрезке времени и осью абсцисс. В сле-

дующие две четверти периода энергетический процесс повторится при другом направлении тока.

Из рассмотренного выше следует, что графически **полная мощность S характеризует амплитуду колебания мощности $S = U \cdot I$ около среднего значения мощности**. Мощность P колеблется от положительного значения $U \cdot I + P$ до отрицательного значения $U \cdot I - P$.

Активная мощность P является средней мощностью преобразования электрической энергии в другие виды. Величина P зависит не только от тока и напряжения, но также от $\cos \varphi$, который обычно называют коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = P/S. \quad (5.50)$$

Коэффициент мощности зависит от соотношения между активным и индуктивным сопротивлениями. По его величине судят о том, какую часть полной мощности цепи составляет активная мощность.

Реактивная мощность Q_L характеризует амплитуду колебания мощности обмена энергией между источником и магнитным полем катушки.

Активную, реактивную и полную мощности можно получить по комплексным значениям напряжения $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$ и тока $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$. Для этого необходимо взять сопряженный комплекс тока (обозначается звездочкой) $\dot{I}^* = Ie^{-j\psi_i}$ и умножить его на комплекс напряжения \dot{U} :

$$\dot{U} \cdot \dot{I}^* = Ue^{j\psi_u} \cdot Ie^{-j\psi_i} = U \cdot Ie^{j(\psi_u - \psi_i)} = Se^{j\varphi_L}.$$

Это произведение обозначают буквой S и называют комплексом полной мощности

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = Se^{j\varphi_L} = S \cos \varphi_L + jS \sin \varphi_L = P + jQ_L. \quad (5.51)$$

Из уравнения (5.51) видно, что **действительной частью комплекса полной мощности является активная мощность P , мнимой частью - комплекс реактивной мощности jQ .**

5.6 Последовательное соединение резистора и идеального конденсатора

Предположим, что в цепи (рис. 5.7, а), состоящей из последовательно соединенных резистора и идеального конденсатора, имеется синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Напряжение на входе этой цепи согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C.$$

Комплексное значение тока может быть записано по заданному уравнению мгновенного значения тока:

$$\dot{i} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i} = I e^{j\psi_i}.$$

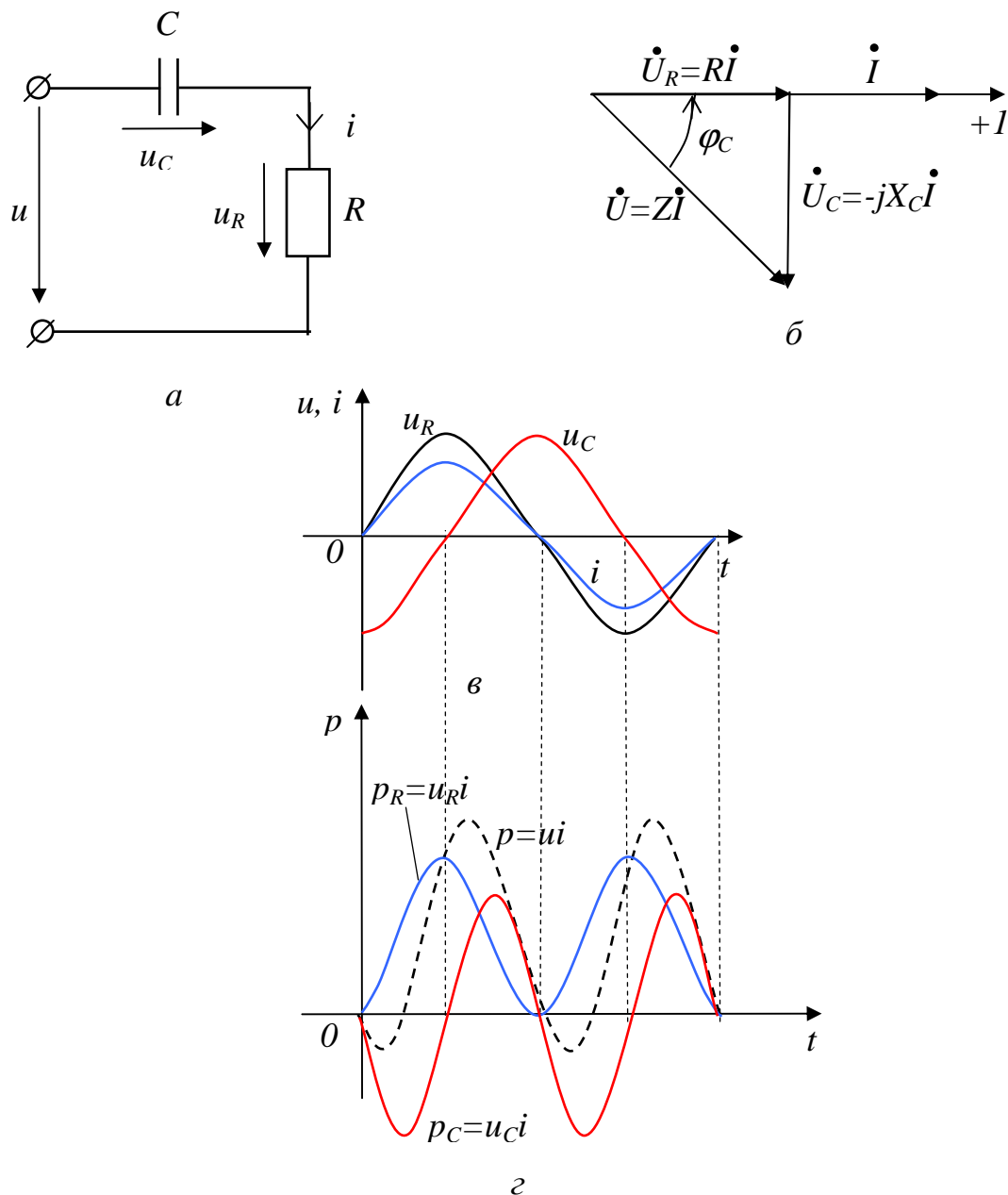


Рисунок 5.7 – Схема (а), графики мгновенных значений напряжений, тока и мощности (в, г), векторная диаграмма (б) цепи последовательно соединенных резистора и емкости

Тогда комплексы активного и емкостного напряжений

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} \quad \text{и} \quad \dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}.$$

Комплекс напряжения на входе цепи

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} - jX_C \cdot \dot{I} = (R - jX_C) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I}.$$

Из последнего уравнения получаем формулу закона Ома в комплексной форме для исследуемой цепи

$$\dot{I} = \dot{U} / \underline{Z}. \quad (5.52)$$

Комплекс полного сопротивления емкостной цепи

$$Z = R - jX_C = \sqrt{R^2 + X_C^2} e^{-j\varphi_C} = Ze^{-j\varphi_C}, \quad (5.53)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ - модуль комплекса полного сопротивления цепи, а $\varphi_C = \arctg X_C / R$ - его аргумент.

Если выражение (5.52) переписать в виде

$$I e^{j\psi_i} = \frac{U e^{j\psi_u}}{Z e^{-j\varphi_C}},$$

то из него можно получить два соотношения:

$$I = U / Z, \quad (5.54)$$

и

$$\psi_i = \psi_u + \varphi_C. \quad (5.55)$$

Уравнение (5.54) представляет собой соотношение между модулями действующих значений напряжения и тока на входе исследуемой цепи (рис. 5.7, а).

Из выражения (5.55) следует, что начальная фаза напряжения ψ_u меньше начальной фазы тока ψ_i на угол сдвига фаз φ_C . Следовательно, напряжение на входе рассматриваемой емкостной цепи отстает по фазе от тока на угол сдвига фаз φ_C . Это можно проиллюстрировать треугольником напряжений, построенным на рисунке 5.7, б для заданной емкостной цепи. Для упрощения построения начальная фаза тока ψ_i принята равной нулю. Вектор тока \dot{I} направлен по оси +1. С ним совпадает по фазе вектор активного напряжения \dot{U}_R и отстает от него по фазе на угол сдвига фаз $\pi/2$ вектор напряжения на конденсаторе \dot{U}_C . Результирующий вектор напряжения \dot{U} на входе цепи отстает по фазе от вектора тока на угол сдвига фаз φ_C . Мгновенное значение этого напряжения

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_C).$$

Мгновенная мощность рассматриваемой емкостной цепи (рис. 5.7, а)

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi_C) \sin \omega t,$$

или

$$p = U \cdot I [\cos \varphi_C - \cos(2\omega t - \varphi_C)].$$

Среднее за период значение мощности

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi_C.$$

Как и для индуктивной цепи (рис. 5.4, а), среднее значение мощности емкостного двухполюсника равно его активной мощности, так как

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi_C = Z \cdot I \cdot I \cdot \frac{R}{Z} = R \cdot I^2.$$

Реактивная мощность, характеризующая амплитуду колебания мощности обмена энергией между цепью и электрическим полем конденсатора,

$$Q = X_C \cdot I^2 = U \cdot I \sin \varphi_C. \quad (5.56)$$

Полная мощность

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q_C^2}. \quad (5.57)$$

Комплекс полной мощности

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = U e^{j\psi_u} \cdot I e^{-j\psi_i} = U \cdot I e^{j(\psi_u - \psi_i)} = U \cdot I e^{-j\varphi_C},$$

или
$$\underline{S} = S e^{-j\varphi_C} = S \cos \varphi_C - jS \sin \varphi_C = P - jQ_C. \quad (5.58)$$

Следует обратить внимание на то, что комплексная мощность не является изображением синусоиды, поэтому над ее символом не ставят точку. Символ комплексной мощности, так же как символ комплексного сопротивления, подчеркивают.

Согласно уравнению (5.58) комплекс реактивной емкостной мощности является отрицательной мнимой частью комплекса полной мощности.

На рисунках 5.8, б и в построены графики мгновенных значений тока i , активного u_R и емкостного u_C напряжений, а также активной $p_R = u_R \cdot i$, реактивной (емкостной) $p_C = u_C \cdot i$ и полной $p = u \cdot i$ мощностей.

Из рисунка видно, что в промежутки времени, когда $p_C > 0$, происходит одновременное преобразование энергии, поступающей от источника питания, в тепловую энергию и в энергию электрического поля конденсатора.

В промежутки времени, когда $p_C < 0$, энергия из электрического поля конденсатора возвращается обратно в цепь. При $p_C > p_R$ часть этой энергии возвращается источнику, а часть преобразуется в тепловую энергию. Мощность в это время отрицательна. При $p_C < p_R$ преобразование электрической энергии в тепловую осуществляется за счет энергии, поступающей от источника питания и из электрического поля конденсатора.

5.7 Последовательное соединение индуктивной катушки и конденсатора

Обычно реальные элементы электрических цепей содержат индуктивную, емкостную и резистивную составляющие сопротивления и могут быть представлены схемой замещения, содержащей последовательно соединенные R , L и C (рис. 5.8, а). Если в такой цепи протекает ток $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$,

комплексное значение которого $\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}$, то согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме для напряжения на входе цепи можно записать уравнение

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (5.59)$$

Если комплексы напряжения резистивного, индуктивного и емкостного участков заменить произведениями комплексов сопротивления и тока, то уравнение (5.59) можно переписать следующим образом:

$$\dot{U} = R \cdot \dot{I} + jX_L \cdot \dot{I} - jX_C \cdot \dot{I} = (R + jX_L - jX_C) \cdot \dot{I} = \underline{Z} \cdot \dot{I}, \quad (5.60)$$

где \underline{Z} - комплекс полного сопротивления цепи, определяемый соотношением:

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) = R \pm jX, \quad (5.61)$$

где $X = X_L - X_C$ – **реактивное сопротивление цепи**.

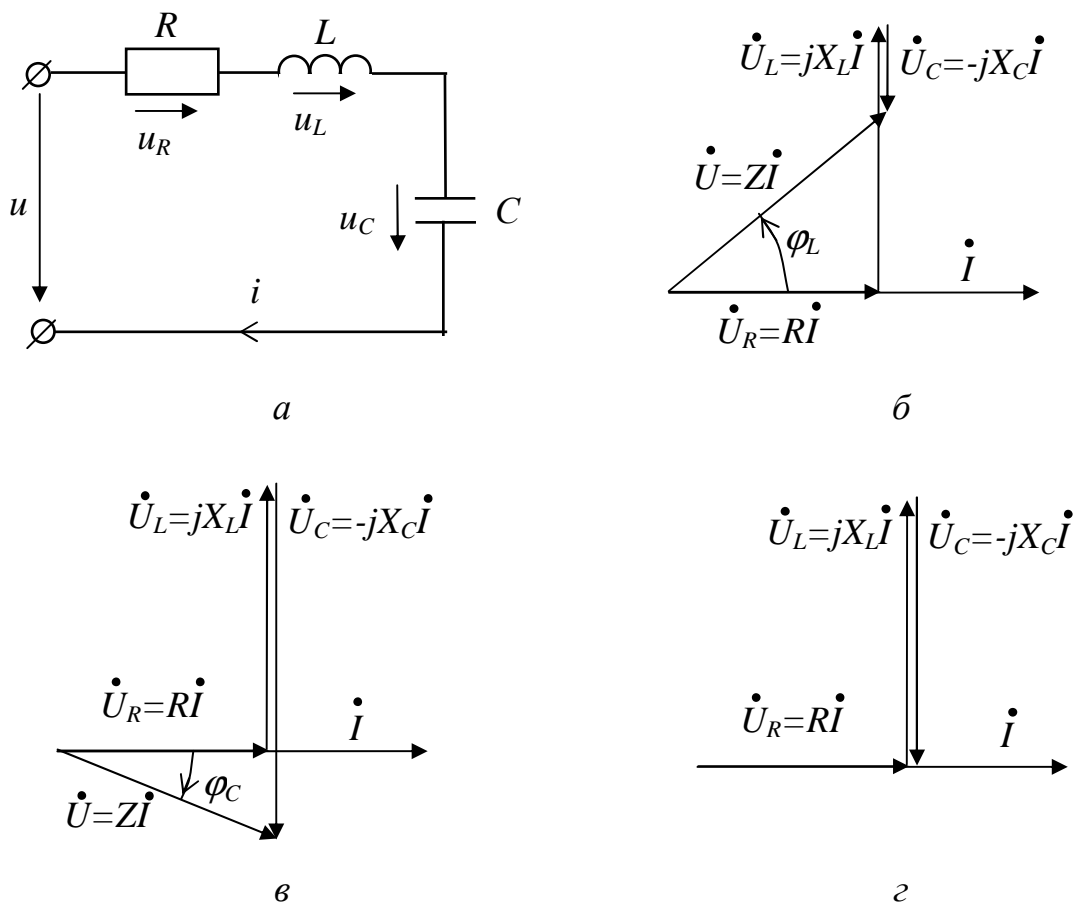


Рисунок 5.8 – Схема (а) и векторные диаграммы (б, в, з) цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов R , L и C

В зависимости от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями рассматриваемой цепи ее общее реактивное сопротивление X может быть: индуктивным ($X_L > X_C$), емкостным ($X_L < X_C$) и чисто активным ($X_L = X_C$).

Комплексы полных сопротивлений цепи в этих случаях определяются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} 1) Z &= R + jX && \text{при } X_L > X_C, \\ 2) Z &= R - jX && \text{при } X_L < X_C, \\ 3) Z &= R && \text{при } X_L = X_C. \end{aligned}$$

На рисунках 5.8, б, в и г построены векторные диаграммы для указанных трех случаев. Начальная фаза тока ψ_i на этих диаграммах принята равной нулю.

Тогда комплекс полного сопротивления элемента для всех трех случаев записывается в виде

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = R + jX. \quad (5.62)$$

Модуль полного сопротивления элемента

$$Z = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)} = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (5.63)$$

Аргумент или угол сдвига фаз φ между векторами напряжения и тока

$$\operatorname{tg} \varphi = (X_L - jX_C)/R = X/R. \quad (5.64)$$

Положительное значение этого угла означает, что реактивное сопротивление имеет индуктивный характер. Вектор напряжения при этом опережает по фазе вектор тока на угол φ . (см. рис. 5.8, б).

Отрицательное значение угла φ означает, что реактивное сопротивление X имеет емкостной характер. Вектор напряжения в этом случае отстает по фазе от вектора тока на угол φ (см. рис. 5.8, в).

Когда $\varphi = 0$, векторы напряжения и тока двухполюсника совпадают по фазе (см. рис. 5.8, г).

Явление, при котором в последовательной цепи из элементов R , L и C общее напряжение цепи совпадает по фазе с ее током, называют **резонансом напряжений**.

Резонанс напряжений возникает, когда реактивное сопротивление цепи равно нулю ($X = 0$), т. е. когда индуктивное сопротивление равно емкостному сопротивлению цепи ($X_L = X_C$). В этом случае индуктивное и емкостное напряжения компенсируют друг друга ($\dot{U}_C - \dot{U}_L = 0$), так как они равны по величине и противоположны по фазе. Значения тока и мощности максимальны, от источника в цепь поступает только активная энергия.

Одинаковые по величине амплитуды колебания реактивных мощностей p_L и p_C при резонансе напряжений находятся в противофазе. Что же касается энергий электрического и магнитного полей, то в те моменты времени, когда энергия запасается в электрическом поле конденсатора, этот запас осуществляется за счет энергии магнитного поля катушки. В

другие моменты времени имеет место обратный переход энергии из электрического поля в магнитное.

Комплекс полной мощности рассматриваемой цепи

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = Z \cdot \dot{I} \cdot \dot{I}^* = (R + jX_L - jX_C) \cdot I^2 = R \cdot I^2 + jX_L \cdot I^2 - jX_C \cdot I^2,$$

или
$$\underline{S} = P + jQ_L - jQ_C, \quad (5.65)$$

где $Q_L = X_L \cdot I^2$ – реактивная мощность, обусловленная наличием в цепи индуктивности;

$Q_C = X_C \cdot I^2$ – реактивная мощность, обусловленная наличием в цепи емкости.

5.8 Цепь переменного тока с параллельно соединенными приемниками

Рассмотрим схему цепи на рисунке 5.9, а, состоящую из двух параллельных ветвей, параметры которых R_1 , L_1 , R_2 и C_2 заданы. Пусть известны напряжение U и частота f источника. Необходимо определить токи, мощности цепи и ее эквивалентное сопротивление относительно входных зажимов.

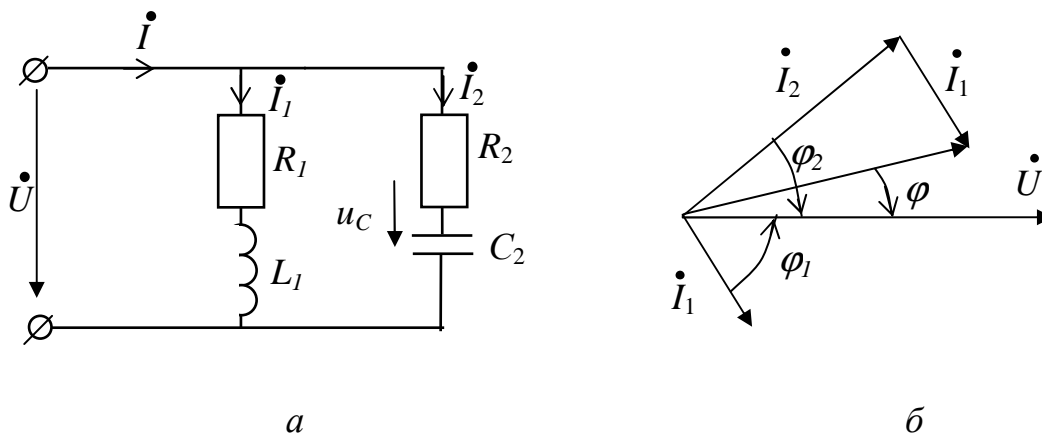


Рисунок 5.9 – Схема (а) и векторная диаграмма (б) цепи, состоящей из двух параллельных ветвей

Расчет можно начать с выбора начальной фазы общего напряжения, для чего вектор напряжения удобно направить по одной из осей +1 или +j. Примем $\dot{U} = U$, что соответствует направлению вектора \dot{U} по оси +1.

Заданные параметры ветвей позволяют записать комплексы их полных сопротивлений:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = Z_1 e^{j\varphi_1},$$

и
$$\underline{Z}_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C_2} = Z_2 e^{-j\varphi_2}.$$

Зная комплексные значения \dot{U} , \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 , можно найти токи ветвей, пользуясь законом Ома в комплексной форме:

$$\dot{I}_1 = \dot{U} / \underline{Z}_1 \quad \text{и} \quad \dot{I}_2 = \dot{U} / \underline{Z}_2. \quad (5.66)$$

Общий ток неразветвленной части цепи определяют по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \quad (5.67)$$

Составим баланс мощности цепи, по которому комплекс полной мощности источника

$$\underline{S}_{ист} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* \quad (5.68)$$

должен быть равен сумме комплексов полных мощностей ее отдельных ветвей:

$$\underline{S}_1 + \underline{S}_2 = \dot{U} \dot{I}_1^* + \dot{U} \dot{I}_2^*. \quad (5.69)$$

Мощности ветвей могут быть подсчитаны и по другим формулам:

$$\underline{S}_1 = \underline{Z}_1 \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + jX_1 \cdot I_1^2 = P_1 + jQ_{L1},$$

$$\underline{S}_2 = \underline{Z}_2 \cdot I_2^2 = R_2 \cdot I_2^2 - jX_2 \cdot I_2^2 = P_2 - jQ_{C2}.$$

Суммарная мощность ветвей

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 = P_1 + P_2 + jQ_{L1} - jQ_{C2}$$

должна быть равна мощности, рассчитанной по формуле (5.68).

Для определения комплекса эквивалентного полного сопротивления \underline{Z} схемы возьмем уравнение (5.61) и вместо токов подставим их значения, выраженные через напряжение \dot{U} и сопротивления \underline{Z} , \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 :

$$\frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} + \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2}.$$

Отсюда имеем:

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2}. \quad (5.70)$$

Если имеется n параллельных ветвей, то вместо формулы (5.70) можно записать более общую формулу для определения эквивалентного сопротивления:

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\underline{Z}_k}. \quad (5.71)$$

Построим векторную диаграмму токов заданной цепи (рис. 5.9, б). За исходный возьмем вектор напряжения, общий для всех ветвей. Направим этот вектор по оси +1 и отложим по отношению к нему векторы токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 ветвей. Вектор тока \dot{I}_1 отстает по фазе от вектора напряжения на угол φ_1 , а вектор тока \dot{I}_2 опережает по фазе вектор напряжения на угол φ_2 . Вектор тока \dot{I} неразветвленного участка, равный геометрической сумме векторов токов ветвей, опережает по фазе вектор напряжения на угол φ .

5.9 Активные и реактивные составляющие проводимости и тока

В цепях синусоидального тока величину, обратную комплексному полному сопротивлению \underline{Z} , называют **комплексом полной проводимости** и обозначают буквой \underline{Y} :

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}. \quad (5.72)$$

Как и всякое комплексное число, комплекс проводимости имеет действительную часть, которую обозначают буквой G и называют **активной проводимостью**, и мнимую часть, обозначаемую буквой B и называемую **реактивной проводимостью**.

Если цепь активно-индуктивная, то ее комплекс сопротивления $\underline{Z} = R + jX_L$ и комплекс проводимости

$$\underline{Y} = \frac{1}{R + jX_L} = \frac{R - jX_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{R}{Z^2} - j \frac{X_L}{Z^2}, \quad (5.73)$$

или

$$\underline{Y} = G - jB_L, \quad (5.74)$$

где активная G и реактивная B_L проводимости определяются соотношениями

$$G = R / Z^2 \quad \text{и} \quad B_L = X_L / Z^2. \quad (5.75)$$

Если цепь активно-емкостная, то ее комплекс сопротивления $\underline{Z} = R - jX_C$ и комплекс проводимости

$$\underline{Y} = \frac{1}{R - jX_C} = \frac{R + jX_C}{R^2 + X_C^2} = \frac{R}{Z^2} + j \frac{X_C}{Z^2}, \quad (5.76)$$

или

$$\underline{Y} = G + jB_C. \quad (5.78)$$

Сравнение (5.73) и (5.76) показывает, что активная G и реактивная B проводимости активно-емкостной и активно-индуктивной цепей определяются одинаковыми формулами. Отличие в том, что **мнимая часть комплекса проводимости положительна для емкостной цепи и отрицательна для индуктивной цепи**.

При использовании векторных диаграмм для анализа явлений в цепях синусоидального тока пользуются также разложением вектора тока на его активную \dot{I}_a и реактивную \dot{I}_p составляющие. Это разложение можно провести графически или аналитически.

Рассмотрим *графический способ разложения* тока. Возьмем схему цепи рисунке 5.9, а, состоящую из двух параллельных ветвей, и на рисунке 5.10, а повторим ее векторную диаграмму, которая была построена ранее на рисунке 5.9, б.

Каждый из векторов тока на диаграмме разложен на две составляющие: активную, совпадающую по фазе с вектором напряжения, и реактивную, перпендикулярную к вектору напряжения. Так как токи совпадают по фазе с напряжением только в активных элементах, а отстают по фазе от напряжения или опережают по фазе напряжение на $\pi/2$ только в реактивных элементах, то *составляющие тока* \dot{I}_a и \dot{I}_p называют *активной и реактивной*.

Модули активных и реактивных составляющих токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2

$$\begin{aligned} I_{1a} &= I_1 \cos \varphi_1, & I_{1p} &= I_1 \sin \varphi_1, \\ I_{2a} &= I_2 \cos \varphi_2, & I_{2p} &= I_2 \sin \varphi_2. \end{aligned}$$

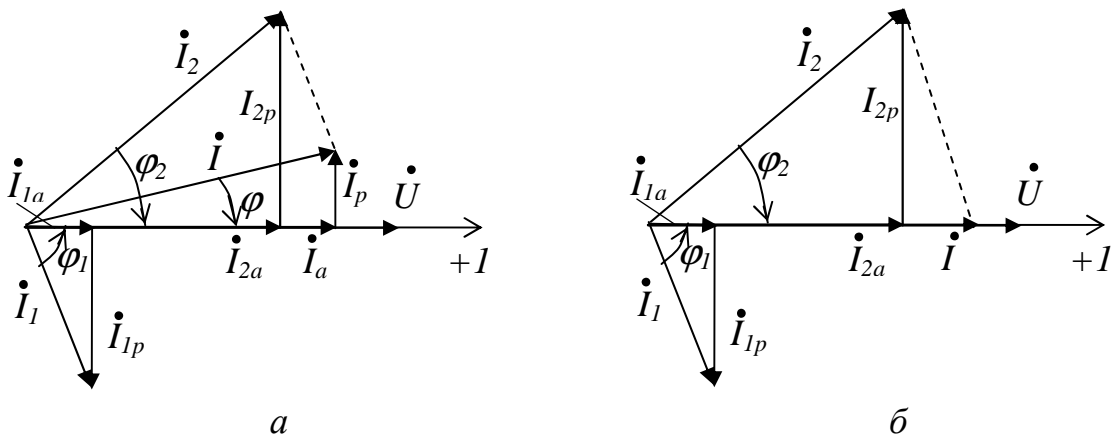


Рисунок 5.10 – Разложение общего вектора тока разветвленной цепи на активные и реактивные составляющие

Составляющие тока и проводимости можно использовать для определения мощности цепи:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_a = G \cdot U^2, \\ Q_L &= U \cdot I \cdot \sin \varphi_L = U \cdot I_{pL} = B_L \cdot U^2, \\ Q_C &= U \cdot I \cdot \sin \varphi_C = U \cdot I_{pC} = B_C \cdot U^2. \end{aligned}$$

При *аналитическом способе разложения* ток какой-либо ветви представляют произведением комплексных значений напряжения и

проводимости:

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot \dot{U} = (G + jB) \cdot \dot{U} = G \cdot \dot{U} + jB \cdot \dot{U} = \dot{I}_a + \dot{I}_p. \quad (5.79)$$

В соотношении (5.79) величина $\dot{I}_a = G \cdot \dot{U}$ называется **активной**, а величина $\dot{I}_p = jB \cdot \dot{U}$ - **реактивной составляющей тока**.

Пользуясь активными и реактивными составляющими проводимости и тока, удобно проводить анализ режимов разветвленной цепи. В качестве примера вернемся к рассмотрению цепи, состоящей из двух параллельных ветвей (см. рис. 5.9, а).

Комплекс эквивалентной полной проводимости этой цепи

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 - jB_L + G_2 + jB_C,$$

или

$$\underline{Y} = G_1 + G_2 - j(B_L - B_C) = G_{\text{экв}} - jB_{\text{экв}}.$$

Если реактивная проводимость индуктивной ветви больше реактивной проводимости емкостной ветви ($B_L > B_C$), то

$$\underline{Y} = G_{\text{экв}} - jB_{\text{экв}},$$

и цепь является активно-индуктивной. Ток неразветвленного участка такой цепи, равный току источника питания, отстает по фазе от напряжения источника. При $B_L < B_C$ цепь является активно-емкостной и ток опережает по фазе напряжение на этом участке.

В параллельной цепи с индуктивными и емкостными приемниками (см. рис. 5.9, а) возможно явление, когда общий ток цепи (ток неразветвленного участка) и напряжение на входе цепи совпадают по фазе. Это явление называют **резонансом тока**.

Реактивные составляющие токов индуктивной и емкостной ветвей при резонансе токов равны по величине и противоположны по фазе (см. рис. 5.11, б). Следовательно, при резонансе токов любой параллельной цепи ее реактивный индуктивный ток \dot{I}_{Lp} и реактивный емкостный ток \dot{I}_{Cp} взаимно компенсируются. Цепь представляет собой активное сопротивление, эквивалентная проводимость которого равна сумме активных проводимостей ветвей (рис. 5.9, а):

$$\underline{Y} = G_{\text{экв}} = G_1 + G_2.$$

Цепь имеет только активные составляющие тока

$$\dot{I} = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{2a}$$

и потребляет только активную энергию, так как реактивные мощности пропорциональны реактивным составляющим их токов:

$$Q_L = U \cdot I_{Lp} \quad \text{и} \quad Q_C = U \cdot I_{Cp},$$

а колебания этих мощностей находятся в противофазе.

Следовательно, цепь при резонансе токов не потребляет от источника реактивной энергии. В ней имеет место взаимный обмен энергиями между электрическим и магнитным полями. Источник питания лишь компенсирует потерю энергии в активных сопротивлениях ветвей.

Представляет особый интерес цепь из двух параллельно соединенных идеальных индуктивного и емкостного элементов (рис. 5.11, а). Условия резонанса токов такой цепи $\dot{I}_{Lp} = \dot{I}_{Cp}$ или $B_L = B_C$, или $1/X_L = 1/X_C$ сводятся к условию $X_L = X_C$. В силу отсутствия активных сопротивлений, общий ток этой цепи равен нулю ($\dot{I} = 0$), хотя в каждой из ветвей протекает ток $\dot{I}_{Lp} = \dot{I}_{Cp}$ (рис. 5.11, б).

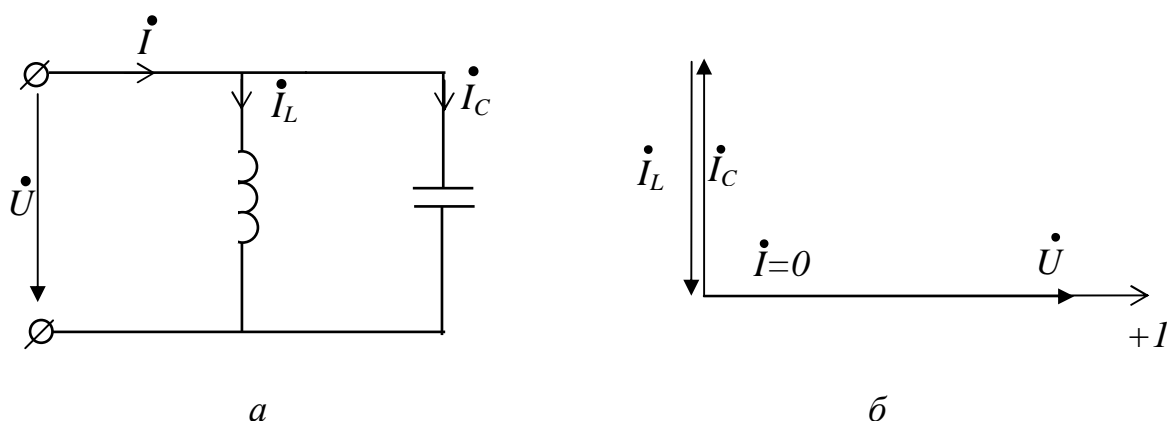


Рисунок 5.11 – Эквивалентная схема параллельного соединения двух идеальных индуктивного и емкостного элементов (а) и ее векторная диаграмма (б)

5.10 Повышение коэффициента мощности в цепях переменного тока

Большинство современных потребителей электрической энергии переменного тока представляют собой индуктивные нагрузки, токи которых отстают по фазе от напряжений источника питания. Активная мощность таких потребителей составляет

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (5.80)$$

и при заданных значениях тока и напряжения зависит еще и от $\cos \varphi$.

Если для потребителя задаются его напряжение U и активная мощность P , то с изменением $\cos \varphi$ изменяется и ток потребителя. С уменьшением $\cos \varphi$ потребителя его ток возрастает:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}. \quad (5.81)$$

Генераторы, питающие потребителей, рассчитывают на определенную **номинальную мощность** $S_H = U_H \cdot I_H$. При заданном напряжении U_H они могут быть нагружены током, не превышающим номинальное значение. По-

этому увеличение тока потребителя вследствие снижения его $\cos\varphi$ не должно превышать определенных пределов. Чтобы ток генератора не был выше номинального при снижении $\cos\varphi$ потребителя, необходимо снижать его активную мощность. В этом случае генератор будет полностью нагружен по току и недогружен по активной мощности.

Для сохранения неизменной активной мощности потребителя при снижении $\cos\varphi$ можно было бы установить генератор на большую номинальную мощность с тем, чтобы увеличение тока вследствие снижения $\cos\varphi$ не превышало его номинального значения. В этом случае активная мощность $P = S_n \cos\varphi$, которой будет нагружен генератор, составляет только часть номинальной мощности S_n . Например, при снижении $\cos\varphi$ от 1 до 0,5 нагрузка генератора составляет только 50% от его номинальной мощности. Таким образом, ***$\cos\varphi$ характеризует как используется номинальная мощность источника и его называют коэффициентом мощности.***

Работа потребителя с малым коэффициентом мощности, кроме ухудшения условий экономического использования источника питания, приводит к увеличению мощности потерь в линии передачи электрической энергии от источника к потребителю. Если сопротивление проводов этой линии R , то мощность потерь в ней

$$\Delta P = R \cdot I^2 = R \cdot \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}. \quad (5.82)$$

Мощность потерь, как видно из (5.82), тем больше, чем ниже $\cos\varphi$ установки. Следовательно, ***чем ниже $\cos\varphi$ потребителя, тем дороже будет обходиться передача к нему электроэнергии.***

Для повышения экономичности энергетических установок принимают меры к повышению коэффициента мощности потребителей.

Идея повышения $\cos\varphi$ заключается в следующем. Общий ток индуктивного потребителя рассматривают состоящим из активной и реактивной составляющих. Активная мощность потребителя при данном напряжении определяется активной составляющей тока $P = U \cdot I_a$, поэтому при заданном значении активной мощности активная составляющая тока должна оставаться неизменной. Снизить ток потребителя в этом случае можно только за счет уменьшения реактивного тока индуктивного потребителя. Это можно осуществить путем параллельного подключения к нагрузке какого-либо приемника с емкостным током. В качестве таких приемников используют батареи специальных конденсаторов.

Рассмотрим пример расчета емкости батареи конденсаторов, которую необходимо включить параллельно индуктивному потребителю с $\cos\varphi$, чтобы довести коэффициент мощности установки до заданного значения. Активная мощность и напряжение потребителя заданы.

На рисунке 5.12, *а* показана эквивалентная схема потребителя $R_n - jX_n$ и батареи конденсаторов C , а на рисунке 5.12, *б* – ее векторная диаграмма. Из диаграммы видно, что для получения угла сдвига фаз требуемой величины ее емкостная ветвь должна иметь ток, равный разности реактивных составляющих токов потребителя до компенсации угла сдвига фаз \dot{I}_{pn} и после компенсации угла сдвига фаз \dot{I}_p :

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{pn} - \dot{I}_p. \quad (5.83)$$

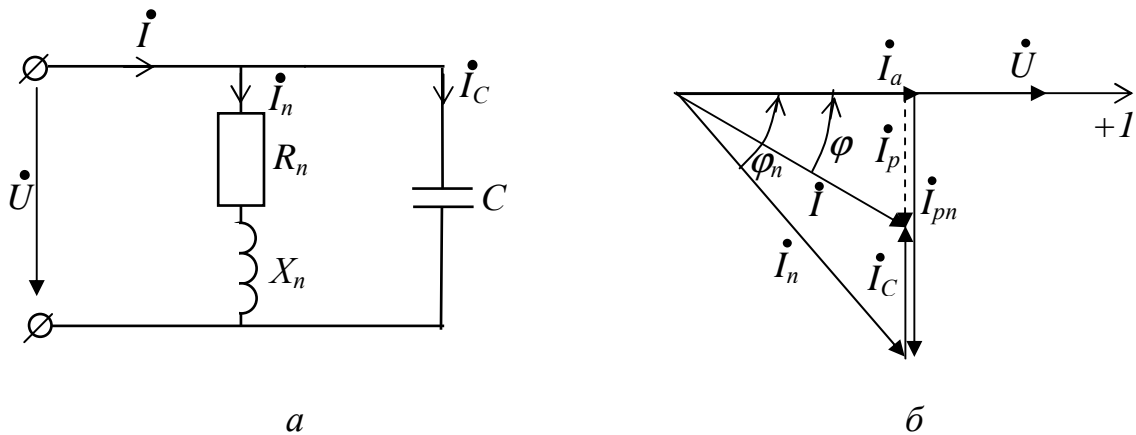


Рисунок 5.12 – Эквивалентная схема потребителя и батареи конденсаторов (*а*) и ее векторная диаграмма (*б*)

Из векторной диаграммы эти токи можно определить через активную составляющую тока потребителя \dot{I}_a :

$$I_{pn} = I_a \operatorname{tg} \varphi_n \quad \text{и} \quad I_p = I_a \operatorname{tg} \varphi.$$

Поэтому выражение (5.83) можно переписать в виде

$$I_c = I_a (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi). \quad (5.84)$$

Ток I_c в этом уравнении может быть выражен через напряжение и емкость ($I_c = U \cdot \omega C$), а ток I_a – через мощность и напряжение ($I_a = P/U$). Поэтому вместо (5.84) получим другое равенство:

$$U \cdot \omega C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi),$$

из которого можно определить искомое значение емкости батарей конденсаторов:

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi). \quad (5.85)$$

Обычно при помощи батарей конденсаторов компенсацию угла сдвига фаз осуществляют до значений $\cos \varphi$ 0,9–0,95.

Выводы

1. При любом направлении тока в резистивном элементе энергия поступает от источника в цепь и преобразуется в тепловую энергию.
2. Вектор напряжения на идеальной катушке опережает по фазе вектор тока на угол сдвига фаз, равный $\pi/2$.
3. В цепи с идеальной катушкой происходит непрерывное колебание энергии между источником и магнитным полем катушки без затрат энергии источника.
4. Вектор напряжения на идеальном конденсаторе отстает по фазе от вектора тока на угол сдвига фаз равный $\pi/2$.
5. В цепи с идеальным конденсатором происходит непрерывное колебание энергии между источником и электрическим полем конденсатора без затрат энергии источника.
6. Активная мощность в цепи равна произведению действующих значений напряжения и тока на косинус угла сдвига фаз между ними.
7. Полная мощность характеризует амплитуду колебания мощности около среднего значения мощности.
8. Реактивная мощность характеризует амплитуду колебания мощности обмена энергией между источником и магнитным полем катушки (электрическим полем конденсатора).
9. Когда индуктивное сопротивление цепи равно последовательно включенному с ним емкостному сопротивлению, в цепи возникает резонанс напряжений, при котором ток и мощность максимальны, и от источника в цепь поступает только активная энергия.
10. Когда индуктивное сопротивление цепи равно включенному параллельно с ним емкостному сопротивлению, в цепи возникает резонанс токов, при котором общий ток в цепи и напряжение на ее входе совпадают по фазе, и цепь не потребляет от источника реактивную энергию.

Вопросы для самопроверки

1. В каких элементах электрической цепи происходит необратимое преобразование электрической энергии?
2. Объясните, почему при постоянном токе включение в цепь конденсатора равносильно разрыву цепи, а при переменном токе цепь остается замкнутой (ток через емкость проходит)?
3. Напишите выражение для мгновенного значения тока в цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов R и L , если к зажимам цепи приложено напряжение $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$.

4. Напишите выражение для мгновенного значения тока в цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов R и C , если к зажимам цепи приложено напряжение $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$.
5. Напишите выражение для мгновенного значения напряжения на зажимах цепи, состоящей из катушки с активным сопротивлением R и индуктивностью L , если мгновенное значение тока $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$. Начертите векторную диаграмму для этой цепи.
6. Катушка с параметрами R и L включена параллельно с конденсатором с емкостью C . Напряжение на зажимах цепи $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$. Напишите выражение для мгновенного значения тока в неразветвленной части цепи.
7. Каковы углы сдвига фаз между напряжениями элементов R , L и C , включенных последовательно?
8. Каковы углы сдвига фаз между токами элементов R , L и C , включенных параллельно?
9. Определите условия для наступления в цепи резонанса напряжений и начертите для этого режима векторную диаграмму.
10. Напишите закон Ома и законы Кирхгофа в комплексной форме.
11. Докажите, что в цепи переменного тока с последовательным включением нескольких элементов возможны условия, при которых напряжение на каком-либо из элементов будет превышать напряжение на входе цепи.
12. Докажите, что в цепи переменного тока с параллельным включением нескольких элементов возможны условия, при которых ток в какой-либо ветви будет превышать ток неразветвленного участка.
13. Запишите выражение для эквивалентного комплексного сопротивления при смешанном соединении сопротивлений.
14. Начертите треугольники сопротивлений и проводимостей и выведите формулы перехода от сопротивлений к проводимостям и обратно.
15. Напишите условие наступления резонанса токов, выраженное через сопротивления параллельных ветвей.
16. Постройте вектор напряжения \dot{U} и вектор тока \dot{i} , сдвинутые между собой на фазовый угол $\varphi > 0$. Разложите тот и другой вектор на активную и реактивную составляющие.
17. Начертите треугольник мощностей и напишите формулы для сторон этого треугольника.
18. Начертите график мгновенной мощности в цепи при различных приемниках (активном, индуктивном, емкостном, смешанном).
19. Что характеризует мгновенная мощность цепи? Докажите, что мгновенная мощность может принимать как положительные так и отрицательные значения.

6 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Ключевые понятия: фаза трехфазной сети, трехфазная система ЭДС, симметричная трехфазная система ЭДС, прямая (обратная) последовательность фаз, нейтраль, фазные ЭДС, линейные ЭДС, соединение звездой (треугольником), симметричная нагрузка, трехфазная четырехпроводная цепь, активная (реактивная, полная, комплексная) мощность трехфазной системы.

6.1 Основные понятия и определения

Объединение в одну цепь нескольких подобных по структуре цепей синусоидального тока одной частоты с независимыми источниками энергии широко применяется в технике. Объединяемые цепи синусоидального тока принято называть **фазами**, а всю объединенную систему цепей – **многофазной системой**. Таким образом, в электротехнике термин "**фаза**" применяется в двух различных смыслах: во-первых, это **параметр периодического процесса**, а во-вторых – **наименование составной части многофазной системы цепей синусоидального тока**. Наибольшее распространение получила трехфазная система.

Трехфазная система была изобретена и разработана во всех деталях, включая трехфазные трансформатор и асинхронный двигатель, выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г. В настоящее время для передачи и распределения энергии в подавляющем большинстве случаев применяются трехфазные системы. **Очень важным преимуществом трехфазной системы является также исключительная простота и дешевизна трехфазных асинхронных двигателей.** Помимо трехфазной системы практическое значение имеет шестифазная система, например в устройствах выпрямления переменного тока, а в некоторых устройствах автоматики применяется двухфазная система.

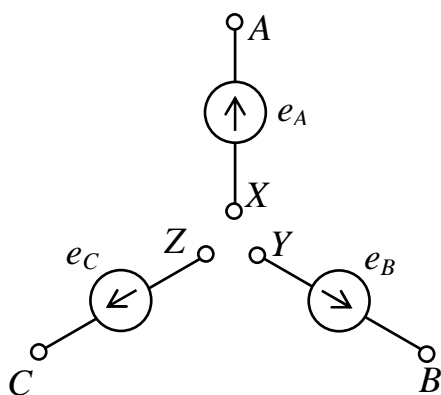


Рисунок 6.1 – Обозначение трехфазного генератора

Для обозначения фаз трехфазной системы применяются буквы латинского алфавита. Первая фаза имеет обозначение A или a – начало фазы, X или x – конец фазы (прописные буквы относятся к источнику, а строчные – к нагрузке). Всю фазу называют фазой A , две другие – фаза B и фаза C . Обозначение трехфазного генератора показано на рисунке 6.1.

За начало фазы принимают зажим, через который ток поступает во

внешнюю цепь при положительном его значении. Концы фаз источника можно соединить друг с другом, тогда во внешней цепи будет действовать суммарная ЭДС. Такая система называется *связанной*.

Трехфазная система ЭДС называется симметричной, если частоты и амплитуды ЭДС каждой из фаз одинаковы, синусоидальны и смещены относительно друг друга на угол $2\pi/3$, т. е. на 120° (рис. 6.2).

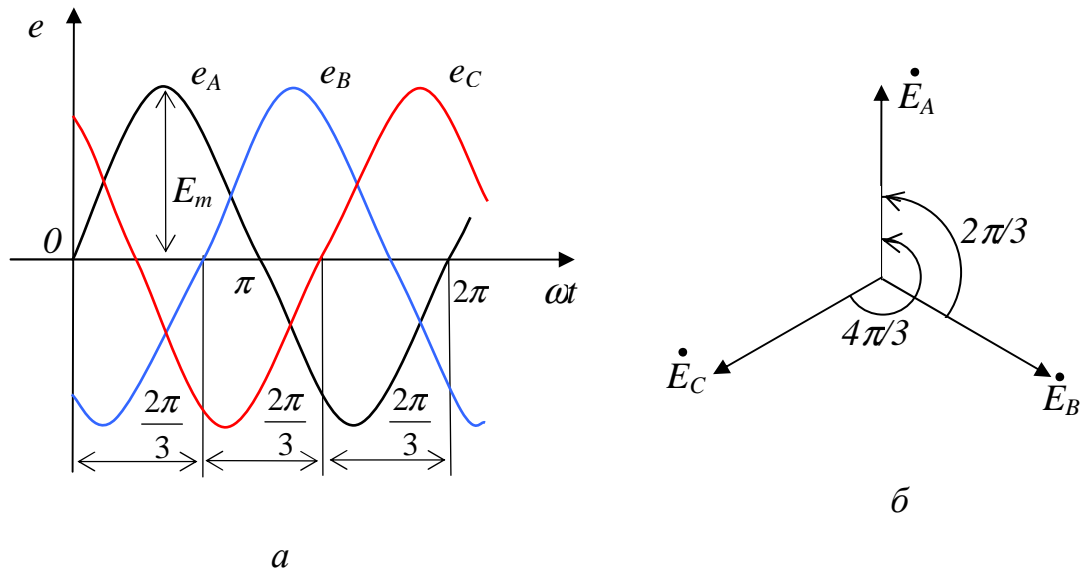


Рисунок 6.2 – Графическое (а) и векторное (б) представление трехфазной симметричной системы ЭДС

В аналитической форме мгновенные и действующие значения наводимых в фазах ЭДС записываются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_{mA} \sin \omega t; & \dot{E}_A &= E; \\ e_B &= E_{mB} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); & \dot{E}_B &= E \cdot e^{-j2\pi/3}; \\ e_C &= E_{mC} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}); & \dot{E}_C &= E \cdot e^{-j4\pi/3} = E \cdot e^{j2\pi/3} \end{aligned} \right\}. \quad (6.1)$$

Как видно из рисунка 6.2, а, в симметричной трехфазной системе сумма мгновенных значений фазных ЭДС в любой момент времени равна нулю

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (6.2)$$

По аналогии можно записать и для действующих значений векторов:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (6.3)$$

На векторной диаграмме (рис. 6.2, б) фаза *B* отстает от фазы *A*, а фаза *C* – от фазы *B*. Такое чередование фаз *ABC* называется **прямой последовательностью**, а чередование фаз *ACB* называется **обратной последовательностью**. Последовательность фаз определяется специальным прибором – фазоуказателем.

В качестве трехфазного источника электрической энергии в основном используются трехфазные синхронные генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую, каждая из трех обмоток якоря которого является источником однофазной синусоидальной ЭДС.

К трехфазным потребителям электрической энергии относятся трехфазные синхронные и асинхронные двигатели и трансформаторы (с нагрузкой), электрические печи, приборы электрического освещения и др.

Существуют различные способы соединения фаз трехфазных источников питания и трехфазных потребителей электроэнергии. Наиболее распространенными являются соединения «звезда» и «треугольник». При этом способы соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены «звездой», фазы потребителей соединяются либо «звездой», либо «треугольником».

6.2 Схемы соединения обмоток трехфазного генератора

Фазы обмотки трехфазного генератора могут быть соединены в звезду (рис. 6.3, а) или в треугольник (рис. 6.3, б).

При соединении в звезду концы фаз объединяются в одну точку N (рис. 6.3, а), которая называется **нулевой** или **нейтральной**. Нагрузку можно подключать к зажимам $N - A$, $N - B$, $N - C$ или $A - B$, $B - C$, $C - A$.

Различают **фазные** E_A , E_B и E_C и **линейные** E_{AB} , E_{BC} и E_{CA} ЭДС, которые, как видно из рисунка 6.3, в, связаны между собой выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B \\ \dot{E}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C \\ \dot{E}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

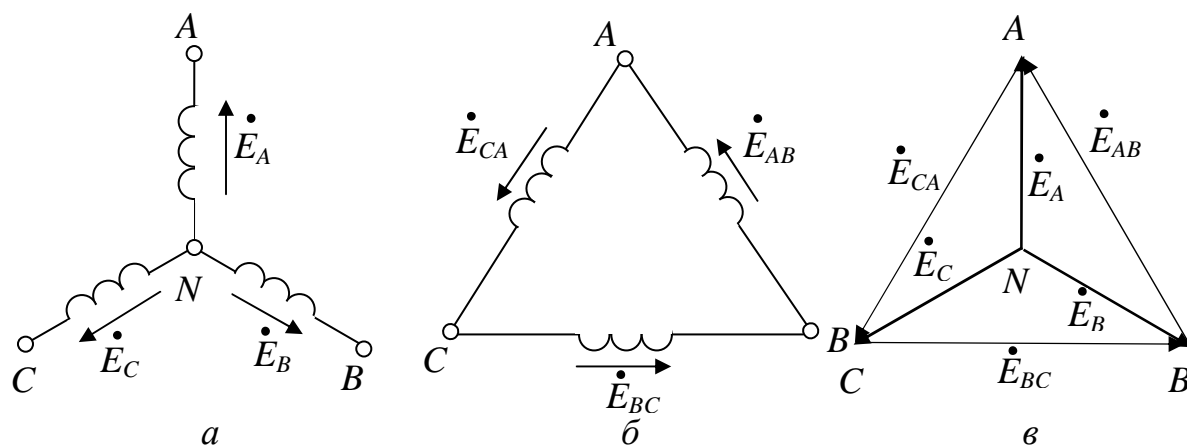


Рисунок 6.3 – Схемы соединения обмоток трехфазного генератора:
а – "звезда", б – "треугольник", в – векторная диаграмма

В симметричной системе система линейных ЭДС симметрична $\dot{E}_{AB} + \dot{E}_{BC} + \dot{E}_{CA} = 0$. При этом соотношение между фазными и линейными ЭДС имеет вид

$$E_{\text{л}} = \sqrt{3}E_{\phi}. \quad (6.5)$$

При соединении фаз источника в треугольник нагрузку подключают к его вершинам (рис. 6.3, б). При этом линейные и фазные ЭДС и напряжения оказываются равными: $E_{\phi} = E_{\text{л}}$; $U_{\phi} = U_{\text{л}}$. Такое соединение возможно лишь при симметричном источнике. В этом случае фазы образуют замкнутый контур, ток в котором отсутствует.

Практически невозможно выполнить все обмотки одинаковыми, т. е. ЭДС всегда несимметрична. В ней появляются уравнивающие токи, что нежелательно. Поэтому практически всегда (за редким исключением) обмотки генератора соединяют звездой.

Приемники электрической энергии могут быть соединены в треугольник и в звезду. Обычно задается значение линейного напряжения источника. Стандартом предусмотрена шкала линейных напряжений: 127, 220, 380, 500, 660 В.

6.3 Соединение трехфазных потребителей звездой

При соединении фаз трехфазного источника питания или потребителя электроэнергии "звездой" (рис. 6.4) концы фаз источника X, Y, Z объединены в общую нейтральную точку N , а начала фаз A, B, C подключаются к соответствующим линейным проводам Aa, Bb, Cc . Аналогичным образом при соединении трехфазных потребителей объединяются в нейтральную точку n концы его фаз x, y, z , при этом начала фаз a, b, c подключаются к линейным проводам.

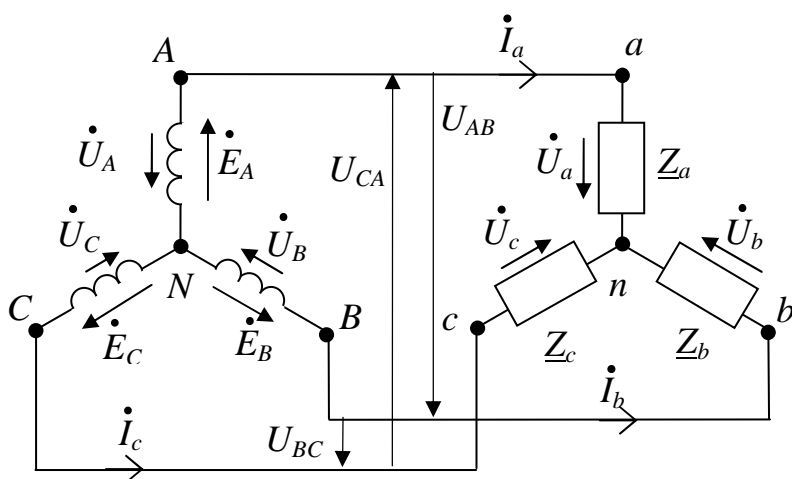


Рисунок 6.4 – Соединение источников и потребителей по схеме "звезда-звезда"

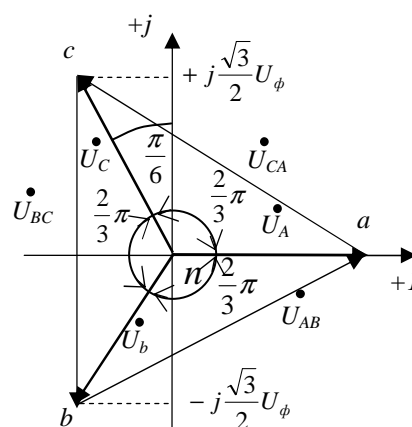


Рисунок 6.5 – Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений

Напряжения U_A, U_B, U_C , действующие между началами и концами фаз источника питания, являются его фазными напряжениями, а напряжения, U_a, U_b, U_c , действующие между началами и концами фаз потребителя, его фазными напряжениями. Напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , действующие между началами фаз источника и напряжения U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , действующие между началами фаз потребителя, являются линейными напряжениями.

На схеме (рис. 6.4) приведены условные положительные направления фазных и линейных напряжений. **Линейные токи** I_L в питающих линиях (I_A, I_B, I_C) при соединении трехфазного источника питания и трехфазного потребителя электроэнергии "звездой", условное положительное направление которых приведено на схеме (рис. 6.4), одновременно являются и **фазными токами** I_ϕ , протекающими в фазах потребителя (I_A, I_B, I_C). Поэтому, в рассматриваемом случае, при наличии симметричной трехфазной системы при соединении фаз потребителя "звездой" линейные токи оказываются равными фазным токам

$$I_\phi = I_L. \quad (6.6)$$

Трехфазные источники питания практически всегда выполняются симметричными. В этом случае действующие значения фазных ЭДС $E_A = E_B = E_C = E_\phi$, а также и фазных напряжений $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ оказываются соответственно равными и сдвинутыми относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$. При этом комплексные, активные и индуктивные сопротивления фаз равны соответственно, т. е.: $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_\phi$, $R_A = R_B = R_C = R_\phi$, $X_A = X_B = X_C = X_\phi$. Значения фазных коэффициентов мощности также оказываются равными $\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C = \cos\varphi_\phi$.

Трехфазные потребители электроэнергии могут быть симметричными и несимметричными. Для симметричных потребителей справедливы соотношения, полученные для трехфазных симметричных источников питания. При этом (см. рис. 6.4) $U_a = U_b = U_c = U_\phi$, $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$, $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi$, $R_a = R_b = R_c = R_\phi$, $X_a = X_b = X_c = X_\phi$, $\cos\varphi_a = \cos\varphi_b = \cos\varphi_c = \cos\varphi_\phi$. Соотношение между фазными и линейными напряжениями определяется выражением

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi. \quad (6.7)$$

Для **несимметричных трехфазных** потребителей не все эти соотношения соблюдаются.

При анализе трехфазных электрических цепей широко используется метод комплексных чисел. С его помощью можно осуществлять расчеты, которые невозможно выполнить другими методами.

На рисунке 6.5 на плоскости комплексных чисел приведена векторная диаграмма фазных $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ и линейных $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ напряжений по-

требителя электроэнергии, при этом вектор фазного напряжения \dot{U}_a направлен по вещественной оси в положительном направлении. С учетом этого фазные напряжения трехфазного симметричного потребителя могут быть представлены в комплексной форме записи:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= U_a = U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} \\ \dot{U}_b &= U_b \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_\phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \\ \dot{U}_c &= U_c \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_\phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned} \right\}. \quad (6.8)$$

В соответствии с принятыми условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений (см. рис. 6.4) линейные напряжения потребителя электроэнергии определяются по уравнениям, составленным в комплексной форме записи для соответствующих замкнутых контуров по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_c - \dot{U}_a.$$

Из векторной диаграммы (рис. 6.5) следует, что линейные напряжения, так же как и фазные напряжения, сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$. При этом для симметричной трехфазной системы векторная сумма фазных напряжений $\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0$ и сумма линейных напряжений $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$.

С учетом приведенных выше выражений линейные напряжения потребителя для симметричной системы могут быть представлены следующими соотношениями:

$$\dot{U}_{AB} = U_\lambda \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right); \quad \dot{U}_{BC} = -jU_\lambda; \quad \dot{U}_{CA} = U_\lambda \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right).$$

Аналогичные выражения можно записать и для симметричного трехфазного источника питания при соединении его фаз "звездой".

Если пренебречь сопротивлениями линейных проводов, соединяющих трехфазный источник питания с трехфазным потребителем электроэнергии, то линейные напряжения потребителей равны соответствующим линейным напряжениям источника питания: $\dot{U}_a = \dot{U}_A$, $\dot{U}_b = \dot{U}_B$, $\dot{U}_c = \dot{U}_C$.

При соединении фаз потребителя «звездой» и симметричной нагрузке комплексные фазные токи определяют, исходя из выражений, записанных по закону Ома для участка цепи:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c}.$$

Так как фазные напряжения и полные сопротивления всех фаз потребителей равны, фазные и линейные токи так же будут равны:

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = I_\lambda. \quad (6.9)$$

6.4 Соединение трехфазных потребителей треугольником

В трехфазных системах наряду с соединением трехфазных потребителей "звездой" применяется соединение фаз "треугольником". При этом не имеет значения, как соединены фазы источника – "звездой" или "треугольником".

Соединение, при котором начало одной фазы потребителя электроэнергии (или источника питания) соединяется с концом другой его фазы, начало которой соединено с концом третьей фазы, а начало третьей – с концом первой фазы (при этом начала всех фаз подключаются к соответствующим линейным проводам), называется **треугольником**.

При соединении "треугольником", как видно из схемы (рис. 6.6), фазные напряжения на потребителе оказываются равными линейным напряжениям ($U_\phi = U_\lambda$).

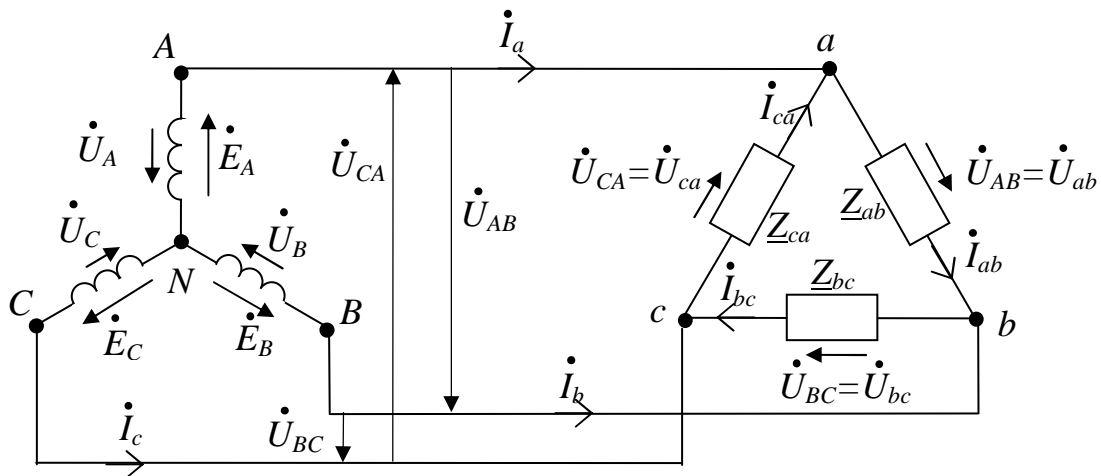


Рисунок 6.6 – Соединение электропотребителей "треугольником"

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB}; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA}.$$

При симметричной системе питания:

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_\phi = U_\lambda. \quad (6.10)$$

Векторная диаграмма напряжений на комплексной плоскости при симметричном питании для активно-индуктивной нагрузки ($\varphi > 0$) представлена

на рисунке 6.7. Здесь комплексное линейное напряжение \dot{U}_{ab} направлено по положительной вещественной оси комплексной плоскости. При этом комплексные линейные напряжения записывают в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= U_{ab} = U_{\text{л}} \\ \dot{U}_{bc} &= U_{bc} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{\text{л}} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ \dot{U}_{ca} &= U_{ca} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_{\text{л}} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (6.11)$$

Соотношение между линейными и фазными токами при соединении потребителя электроэнергии треугольником и симметричной нагрузке определяют из уравнений, составленных для токов в соответствии с первым законом Кирхгофа для узлов a, b, c разветвления электрической цепи (см. рис. 6.6): $\dot{I}_A + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} = 0$; $\dot{I}_B + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = 0$; $\dot{I}_C + \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = 0$.

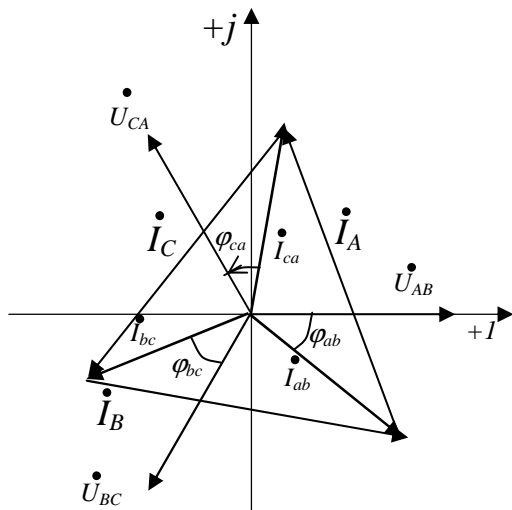


Рисунок 6.7 – Векторная диаграмма токов и напряжений при соединении потребителя "треугольником"

При симметричной нагрузке линейные токи $I_A = I_B = I_C$ и фазные токи $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$. При этом угол сдвига фаз между фазными токами и напряжениями $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}$, так как в данном случае коэффициент мощности $\cos \varphi_{ab} = \cos \varphi_{bc} = \cos \varphi_{ca}$.

В соответствии с этими уравнениями на рисунке 6.7. построена векторная диаграмма фазных и линейных токов потребителя, из которой следует, что при соединении фаз симметричного трехфазного потребителя электроэнергии "треугольником" между линейными и фазными токами имеет место соотношение

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi}. \quad (6.12)$$

6.5 Трехфазные четырехпроводные электрические сети

В трехфазных четырехпроводных электрических цепях кроме линейных проводов, соединяющих начала фаз источника питания и потребителя электроэнергии, имеется также нейтральный провод, соединяющий нейтральную точку N источника с нейтральной точкой n потребителя (рис. 6.8), что обеспечивает симметрию фазных напряжений источника и потребителя, так как нейтральный провод уравнивает потенциалы нейтральных точек N и n .

Трехфазные четырехпроводные системы питания электропотребителей получили широкое распространение в распределительных сетях промышленных предприятий, жилых и гражданских зданий. Они позволяют получить два отличающихся на $\sqrt{3}$ напряжения – фазное U_ϕ и линейное $U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi$. При смешанных силовой и осветительной нагрузках силовые потребители электроэнергии питаются линейными напряжениями $U_\lambda = 660; 380; 220$ В. Для осветительной нагрузки используются фазные напряжения $U_\phi = 220; 127$ В.

В четырехпроводных электрических цепях фазы источника и фазы потребителя всегда соединяются "звездой".

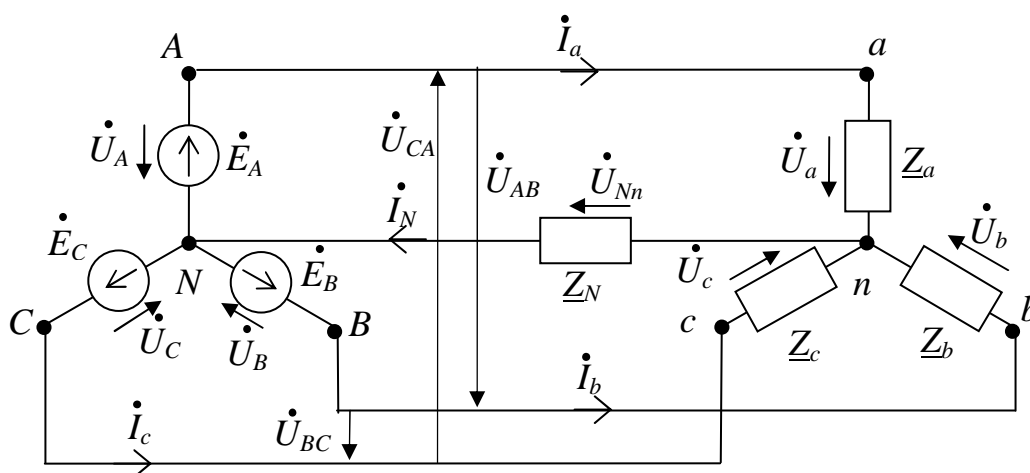


Рисунок 6.8 – Трехфазная четырехпроводная электрическая сеть

При несимметричной нагрузке комплексные сопротивления фаз потребителя не одинаковы ($Z_a \neq Z_b \neq Z_c$), при этом комплексное напряжение (U_{nN} , действующее между нейтральными точками N и n системы, определяют по методу двух узлов

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_a + \dot{E}_B \underline{Y}_b + \dot{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (6.13)$$

где $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – комплексные ЭДС источника питания;

$\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$ – комплексные проводимости фаз потребителя и нейтрального провода.

При симметричной нагрузке $Z_a = Z_b = Z_c$ сумма комплексных токов в точке n разветвления цепи, записанная в соответствии с первым законом Кирхгофа, равна нулю: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N = 0$, и ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N = 0$. При этом напряжение, действующее между нейтральными точками так же равно нулю: $\dot{U}_{nN} = \underline{Z}_N \dot{I}_N = 0$.

Пренебрегая внутренним сопротивлением симметричного источника питания и учитывая, что ЭДС в фазах равны $E_A = E_B = E_C = E_\phi = \sqrt{3} U_\lambda$, ком-

плесное напряжение, действующее между нейтральными точками системы, определяется выражением

$$U_{Nn} = \frac{U_n(\underline{Y}_a + a^2 \underline{Y}_b + a \underline{Y}_c)}{\sqrt{3}(\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N)}, \quad (6.14)$$

где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})$ и $a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})$ – поворотные множители (операторы).

Комплексные фазные напряжения потребителя электроэнергии находят из уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для соответствующих замкнутых контуров системы (рис. 6.9):

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN}.$$

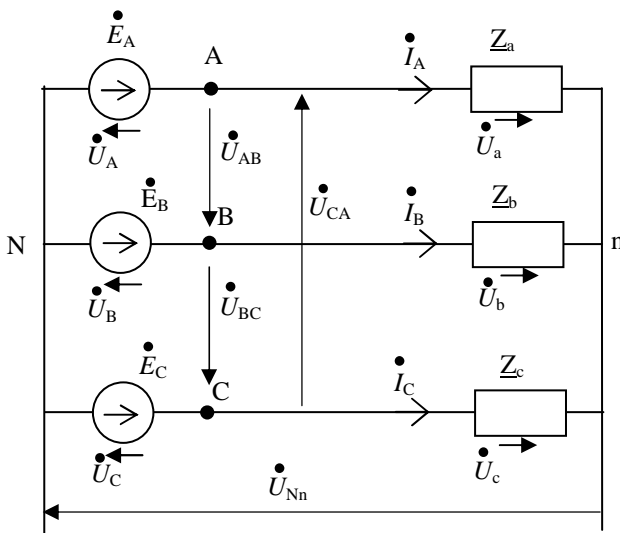


Рисунок 6.9 – Расчетная схема

При этом комплексные фазные токи потребителя определяют по закону Ома для соответствующих участков цепи:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \dot{I}_B = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \dot{I}_C = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Комплексный ток в нейтральном проводе находят в соответствии с уравнением, составленным по первому закону Кирхгофа для нейтральной точки цепи n : $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

При симметричной нагрузке фазные напряжения равны:

$$U_a = U_b = U_c = U_\phi,$$

при этом

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}}; \quad I_A = I_B = I_C = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}Z_\phi}.$$

При обрыве нейтрального провода, его полное сопротивление $\underline{Z}_N = \infty$, а полная проводимость $\underline{Y}_N = 0$.

При несимметричной нагрузке потребителя электроэнергии ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$) на векторной диаграмме происходит смещение нейтральной точки n потребителя относительно нейтральной точки N источника, что приводит к перекосу фазных напряжений потребителя. В результате на одних фазах потребителя напряжение будет больше, чем на других, что во многих случаях недопустимо. В частности, при питании осветительной нагрузки одни осветительные приборы оказываются под напряжением, меньшим номинального, а другие – под напряжением, большим номинального. Это приводит к преждевременному выходу осветительных приборов

из строя. В связи с этим, в нейтральном проводе четырехпроводной

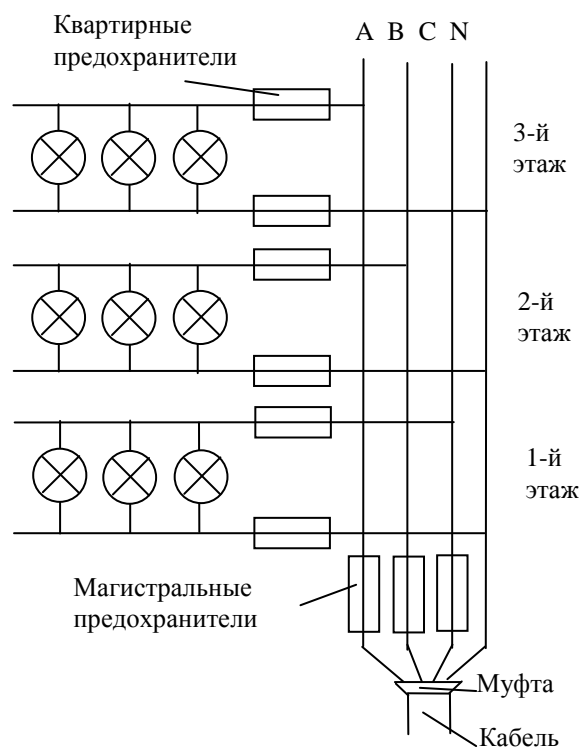


Рисунок 6.10 – Четырехпроводная электрическая сеть

электрической сети запрещена установка предохранителей или выключателей (рис. 6.10), так как при отключенном нейтральном проводе фазные напряжения могут оказаться неравными. В результате напряжение одних фаз будет меньше номинального, а других – больше. Как следствие, например в цепях осветительных установок, будет наблюдаться недокал ламп в фазах с пониженным напряжением, и перекал и преждевременное перегорание ламп в фазах с повышенным напряжением. Перегорание же одного из магистральных предохранителей приведет к отключению электроприемников соответствующей магистрали.

6.6 Активная, реактивная и полная мощность трехфазной электрической сети

Под *активной (реактивной, полной) мощностью трехфазной системы* понимают сумму активных (реактивных, полных) мощностей всех фаз источника энергии, равную сумме активных (реактивных, полных) мощностей всех фаз приемника.

Трехфазная четырехпроводная система обеспечивает потребителя электроэнергией симметричным питанием. При этом активная, реактивная и полная мощности могут быть определены по следующим формулам с учетом знака реактивных сопротивлений:

$$\left. \begin{aligned} P &= I_A^2 R_a + I_B^2 R_b + I_C^2 R_c = I_A \cdot U_a \cdot \cos \varphi_a + I_B \cdot U_b \cdot \cos \varphi_b + I_C \cdot U_c \cdot \cos \varphi_c; \\ Q &= I_A^2 \cdot X_a + I_B^2 \cdot X_b + I_C^2 \cdot X_c = I_A \cdot U_a \cdot \sin \varphi_a + I_B \cdot U_b \cdot \sin \varphi_b + I_C \cdot U_c \cdot \sin \varphi_c; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{aligned} \right\} \quad (6.15)$$

где $\cos \varphi_a = R_a / Z_a$, $\cos \varphi_b = R_b / Z_b$, $\cos \varphi_c = R_c / Z_c$, $\sin \varphi_a = X_a / Z_a$, $\sin \varphi_b = X_b / Z_b$, $\sin \varphi_c = X_c / Z_c$.

При симметричной нагрузке эти формулы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} P &= 3I_{\phi}^2 R_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi} \\ Q &= 3I_{\phi}^2 X_{\phi} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi} \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \end{aligned} \right\}, \quad (6.16)$$

где $\cos \varphi_{\phi} = R_{\phi} / Z_{\phi}$, $\sin \varphi_{\phi} = X_{\phi} / Z_{\phi}$.

Для расчета сложных цепей переменного тока используется также понятие **комплексной мощности трехфазной цепи**, которая представляет собой **сумму комплексных мощностей всех фаз источника энергии, равную сумме комплексных мощностей всех фаз приемника**.

В комплексной форме записи полная мощность трехфазной электрической цепи:

$$\dot{S} = P \pm jQ, \quad (6.17)$$

Полную мощность каждой из фаз потребителя можно определить по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_a &= P_a \pm jQ_a = \dot{U}_a \cdot I_a^* \\ \dot{S}_b &= P_b \pm jQ_b = \dot{U}_b \cdot I_b^* \\ \dot{S}_c &= P_c \pm jQ_c = \dot{U}_c \cdot I_c^* \end{aligned} \right\}, \quad (6.18)$$

где I_a^* , I_b^* , I_c^* - сопряженные комплексные токи в соответствующих фазах.

6.7 Сравнение условий работы приемника при соединении его фаз треугольником и звездой

Схема соединения трех фаз приемника не зависит от схемы соединения трех фаз генератора. Соединение фаз приемника треугольником часто переключается на соединение звездой для изменения тока и мощности, например для уменьшения пусковых токов трехфазных двигателей, изменения температуры трехфазных электрических печей и т. д.

Рассмотрим, как изменяются действующие значения токов симметричного приемника с полным фазным сопротивлением Z_{ϕ} при переключении фаз со звезды на треугольник, например, трехполюсным переключателем (рис. 6.11).

При соединении фаз приемника звездой между действующими значениями фазных и линейных токов (6.6) и напряжений (6.7) имеют место соотношения

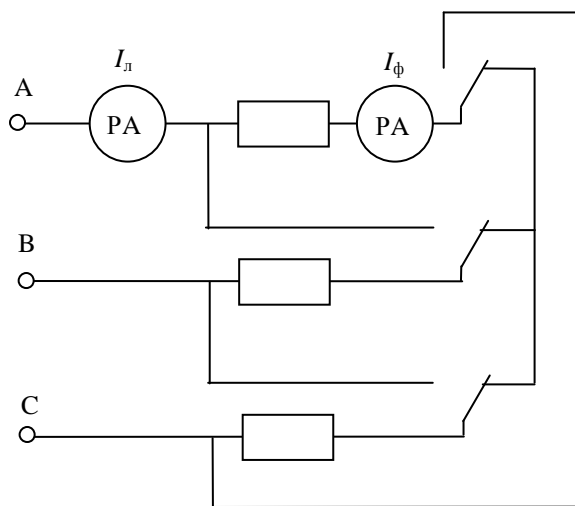
$$I_{\phi Y} = U_{\phi Y} / Z_{\phi} = I_{\text{л}Y}, \quad U_{\phi Y} = U_{\text{л}} / \sqrt{3},$$

из которых следует, что

$$I_{\Delta Y} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}Z_{\phi}}. \quad (6.19)$$

При соединении фаз приемника треугольником между действующими значениями фазных и линейных токов (6.12) и напряжений (6.11) имеют место соотношения

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U_{\phi\Delta}}{Z_{\phi}} = \frac{I_{\Delta\Delta}}{\sqrt{3}}; \quad U_{\phi\Delta} = U_{\Delta},$$



из которых следует, что

$$I_{\Delta\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_{\Delta}}{Z_{\phi}}. \quad (6.20)$$

Сопоставив выражения для действующих значений линейных токов при соединении фаз приемника "звездой" (6.19) и "треугольником" (6.20), получим при одном и том же действующем значении линейного напряжения U_{Δ} и одинаковых полных фазных сопротивлениях Z_{ϕ} .

$$I_{\Delta\Delta} = 3I_{\Delta Y},$$

а для действующих значений фазных

Рисунок 6.11 – Схема переключения трехфазного приемника со звезды на треугольник

ТОКОВ

$$I_{\phi\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi Y}.$$

Активная мощность трехфазного симметричного приемника при любой из схем соединения в соответствии с (6.15) равна

$$P = \sqrt{3}U_{\Delta}I_{\Delta} \cos \varphi.$$

Вследствие уменьшения действующего значения линейного тока при переключении фаз приемника с "треугольника" на "звезду" мощность уменьшается в 3 раза, т. е.

$$P_{\Delta} = 3P_Y. \quad (6.21)$$

Выводы

1. В трехфазных электрических системах применяют две схемы соединения потребителей – «звезда» и «треугольник». Источники электрической энергии, как правило, соединяют по схеме "звезда".
2. В симметричной трехфазной системе линейные (фазные) напряжения сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$.
3. В симметричной трехфазной системе векторная сумма фазных (линейных) напряжений равна нулю.

4. В симметричной трехфазной системе при соединении фаз потребителя «звездой» линейные токи равны фазным токам.
5. В симметричной трехфазной системе при соединении фаз потребителя «звездой» линейные напряжения в $\sqrt{3}$ больше фазных.
6. В симметричной трехфазной системе при соединении фаз потребителя «треугольником» фазные напряжения равны линейным напряжениям.
7. В симметричной трехфазной системе при соединении фаз потребителя «треугольником» линейные токи в $\sqrt{3}$ больше фазных.
8. В трехфазных четырехпроводных электрических цепях фазы источника и фазы потребителя всегда соединяют «звездой».
9. В трехфазных четырехпроводных электрических цепях нулевой провод обеспечивает симметрию фазных напряжений источника и потребителя.
10. При переключении фаз приемника с «треугольника» на «звезду» его активная мощность уменьшается в 3 раза.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните преимущества трехфазной системы.
2. Как обозначают фазы трехфазной системы?
3. В каком случае трехфазная система считается симметричной?
4. Что называется прямой и обратной последовательностями чередования фаз?
5. Запишите выражения для мгновенных значений ЭДС, наводимых в фазах.
6. Запишите выражения для действующих значений наводимых в фазах ЭДС.
7. Что понимают под нейтралью трехфазной сети?
8. Запишите выражения для фазных и линейных ЭДС. Поясните их смысл и различие.
9. Какие схемы соединения фаз применяют в трехфазных сетях? Начертите схемы.
10. Запишите в комплексной форме фазные напряжения трехфазного симметричного потребителя, соединенного по схеме «звезда».
11. Нарисуйте векторную диаграмму фазных и линейных напряжений потребителя, включенного по схеме «звезда».
12. Нарисуйте векторную диаграмму напряжений и токов потребителя, включенного по схеме «треугольник».
13. Как подключают нагрузку при соединении фаз источника в треугольник? Чему при этом равны линейные ЭДС и напряжения?
14. Как подключают нагрузку при соединении фаз источника в звезду? Чему при этом равны линейные ЭДС и напряжения?
15. Объясните особенности трехфазных четырехпроводных цепей.
16. Запишите соотношения для активной, реактивной и полной мощностей трехфазной симметричной цепи.

Раздел III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

7 ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Ключевые понятия: измерения, средства электрических измерений, мера, эталон, образцовая мера, рабочая мера, электроизмерительный прибор (ЭИП), измерительный преобразователь, электроизмерительная установка, электроизмерительная информационная система, нормирующее значение ЭИП, цена деления ЭИП, чувствительность ЭИП, порог чувствительности, погрешность, амперметр, вольтметр.

7.1 Основные понятия

Методы, способы и средства обеспечения единства получения требуемой точности измерений физических величин изучает наука метрология. Под *единством измерений* понимают сопоставимость результатов независимо от того где, когда, кем и какими средствами измерялась данная физическая величина.

В настоящее время для измерения физических величин различного характера и природы в науке и на производстве широко применяются электрические методы. Их основными преимуществами являются: высокая чувствительность, возможность автоматизации процесса измерения, малое потребление энергии. Применение преобразователей неэлектрических величин в электрические позволяет сегодня выполнять измерения практически всех параметров технологических процессов строительной отрасли.

Количество подлежащих измерению механических, тепловых и других неэлектрических величин, интересующих науку и производство, во много раз превышает количество всех возможных электрических и магнитных физических величин. Измерение неэлектрических величин электрическими методами достигло сейчас высокого уровня развития и образует крупную и разветвленную область современной техники, которая обеспечивает возможность проведения любого необходимого измерения.

Под *измерением* понимают процесс, состоящий в сравнении путем эксперимента измеряемой физической величины с некоторым ее значением, принятым за единицу. Или, другими словами, измерение – это определение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств.

Результаты измерений в общем случае могут быть записаны следующим образом

$$X=n(x), \quad (7.1)$$

где X – измеряемая величина;

n – количественная характеристика измерения;

x – единица измерения.

Различают *истинное и действительное значения измеряемой величины*. Под истинным понимают значение, свободное от погрешности измерения. Под действительным значением понимают значение, полученное в результате измерения с допускаемой погрешностью. Если погрешностью измерения можно пренебречь, то истинное значение совпадает с действительным

$$X_{ист} \approx X_{д.}$$

Средствами электрических измерений называют технические устройства, используемые при электрических измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики. К средствам электрических измерений относятся меры, электроизмерительные приборы, измерительные преобразователи, электроизмерительные установки и измерительные информационные системы.

Мерой называют средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного значения. К основным мерам электрических величин относятся меры ЭДС, электрического тока, электрического сопротивления, индуктивности, электрической емкости и др.

В зависимости от степени точности и области применения меры подразделяют на эталоны, образцовые меры и рабочие меры. *Эталоны* обеспечивают воспроизведение и хранение единицы физической величины для передачи ее размера другим средствам измерения. *Образцовые меры* служат для поверки и градуировки рабочих мер и измерительных приборов. *Рабочие меры* используют для поверки измерительных приборов, а также для измерения в научных организациях и на промышленных предприятиях.

Электроизмерительными приборами (ЭИП) называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. К ним относятся, например, амперметр, вольтметр, ваттметр, счетчик электрической энергии.

Измерительными преобразователями называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигнала электрической информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Их подразделяют на преобразователи электрических величин в электрические (шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы и т. д.), на преобразователи неэлектрических величин в электрические и на первичные преобразователи (терморезисторы, термопары, тензорезисторы, емкостные и индуктивные преобразователи и т. д.).

Электроизмерительная установка представляет собой совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенную для выработки сигналов измерительной инфор-

мации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенную в одном месте.

Измерительная информационная система – совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации от ряда источников в форме, удобной для обработки, передачи и использования в автоматических системах управления.

7.2 Классификация электроизмерительных приборов

ЭИП используют для измерения параметров электрических цепей: тока, напряжения, мощности, сопротивления, емкости и индуктивности.

Классификация ЭИП осуществляется по нескольким принципам.

По принципу действия ЭИП делятся на следующие группы: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, электростатические, ферродинамические. Наибольшее распространение получили первые две группы.

По роду измеряемого тока различают ЭИП постоянного и переменного тока.

По виду измеряемого параметра различают: амперметры – измерение тока; вольтметры – измерение напряжения; ваттметры – измерение активной мощности; омметры – измерение активного сопротивления и т. д.

По способу представления результатов измерения различают аналоговые и цифровые приборы.

По назначению различают приборы промышленного применения, приборы, входящие в сложные информационные системы, лабораторные приборы.

Существуют также **комбинированные приборы**, позволяющие измерять несколько параметров электрических цепей.

Кроме того, приборы подразделяют на показывающие, регистрирующие (самопишущие) и суммирующие (счетчики, интеграторы).

В показывающих приборах отсчет значения измеряемой величины производится по положению стрелки относительно шкалы прибора.

Самопишущие приборы обеспечивают как непрерывную запись измеряемой величины на бумаге, так и непосредственный отсчет показаний по измерительной стрелке.

Суммирующие (интегрирующие) приборы обеспечивают суммирование показаний за определенный требуемый период работы.

7.3 Общие технические характеристики электроизмерительных приборов

При электрических измерениях необходимо учитывать минимальный и максимальный пределы измерений, цену деления прибора, его чувствительность, погрешность измерения, входное сопротивление, потребляемую мощность.

Верхний предел измерительного прибора называется **нормирующим значением** X_n .

У многопредельных ЭИП стрелка показывает измеряемую величину в делениях. Чтобы перейти к величине измерения нужно определить **цену деления** (количество единиц измеряемого параметра в одном делении шкалы ЭИП):

$$C = \frac{X_n}{N}, \quad (7.2)$$

где N – число делений шкалы.

Значение физической величины определяется по формуле:

$$X = C \cdot n, \quad (7.3)$$

где n – число делений, на которое отклонилась стрелка прибора.

Под **чувствительностью ЭИП** понимают отношение изменения сигнала на выходе прибора к изменению измеряемой величины. Чем меньшее изменение измеряемой величины прибор будет отмечать, тем больше возможности для получения высокой точности измерения.

Различают абсолютную $S_{аб}$ и относительную $S_{от}$ чувствительности:

$$S_{аб} = \frac{\Delta l}{\Delta X} \quad ; \quad S_{от} = \frac{\Delta l}{\Delta X / X}, \quad (7.4)$$

где Δl – изменение сигнала на выходе прибора;

ΔX – изменение измеряемой величины;

X – значение измеряемой величины.

Изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее перемещение указателя прибора, которое можно заметить при нормальном способе отсчета, называется **порогом чувствительности**.

Чувствительность S связана с ценой деления прибора C следующим соотношением:

$$S = \frac{1}{C}. \quad (7.5)$$

Пределы допускаемых погрешностей (основных и дополнительных) могут быть выражены в формах абсолютной, относительной и приведенной погрешности. Более подробно ошибки средств и методов измерений рассмотрены в подразделе 8.1.

7.4 Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы применяют в цепях постоянного тока для измерения тока и напряжения; они имеют целый ряд достоинств: высокую чувствительность и точность, равномерность шкалы и малое потребление мощности.

Принцип действия ЭИП магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого измеряемым током в подвижной катушке, с магнитным полем постоянного магнита. В результате подвижная катушка поворачивается на угол, пропорциональный величине измеряемого тока. На рисунке 7.1 показано устройство ЭИП магнитоэлектрической системы с внутрирамочным магнитом. В приборе имеется постоянный магнит 1 и кольцевой магнитопровод 2, изготовленный из магнитомягкой стали.

В силу неравномерности магнитного потока постоянного магнита, на различных участках воздушного зазора создается неравномерное магнитное поле. Для устранения этого недостатка устанавливают магнитомягкие стальные накладки 3, распределяющие радиальное магнитное поле равномерно.

В воздушном зазоре между магнитом 1 с накладками 3 и магнитопроводом 2 находится подвижная катушка 4, выполненная в виде рамки из изолированного медного провода. Рамку закрепляют на подпятниках, и она свободно вращается относительно своей оси.

Спиральная пружина, связанная с осью прибора, при повороте рамки создает противодействующий момент.

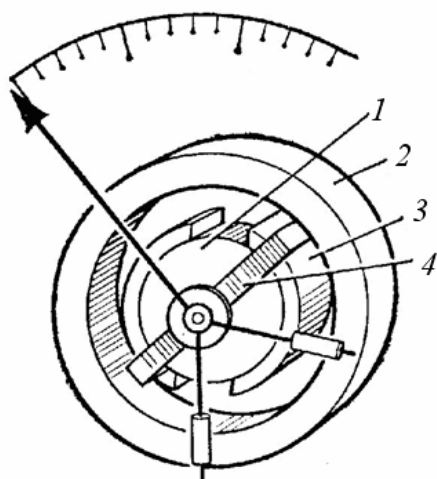


Рисунок 7.1 – Устройство ЭИП магнитоэлектрической системы

При включении прибора в электрическую цепь в его рамке протекает электрический ток. Взаимодействие тока в рамке с магнитным полем постоянного магнита приводит к созданию вращающего момента рамки, пропорционального величине тока

$$M_{\text{вр}} = k_1 I, \quad (7.6)$$

где $M_{\text{вр}}$ – вращающий момент;

I – ток в рамке;

k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров рамки, числа витков, величины магнитной индукции в воздушном

зазоре между наконечниками постоянного магнита и сердечником, а также от системы единиц измерения.

Под действием вращающего момента рамка поворачивается, спиральные пружинки закручиваются и создают противодействующий момент

$$M_{\text{пр}} = k_2 \alpha, \quad (7.7)$$

где k_2 – коэффициент, зависящий от упругих свойств пружины;
 α – угол закручивания пружины (угол поворота рамки).

При равенстве вращающего и противодействующего моментов, действующих на рамку, наступает ее равновесие $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, т. е. $k_1 \cdot I = k_2 \cdot \alpha$, откуда можно получить угол поворота рамки со стрелкой $\alpha = (k_1/k_2) I = k \cdot I$.

Из последнего уравнения следует, что **угол поворота стрелки магнитоэлектрического прибора прямо пропорционален значению тока, проходящего через рамку, а шкала прибора является равномерной.**

Приборы данной системы строго полярные и для правильного включения в электрическую цепь зажимы прибора имеют маркировку «+» и «-».

7.4.1 Измерение постоянного тока. Приборы для измерения тока называются **амперметрами**. В электрическую цепь амперметр включают последовательно, причем сопротивление прибора должно быть во много раз меньше сопротивления электрической цепи.

Для измерения токов, превышающих предельный ток прибора, используются шунты. Шунт представляет собой сопротивление $R_{\text{ш}}$, включенное параллельно измерительному прибору. В некоторых случаях для удобства измерений малых и больших токов прибор имеет несколько шунтов. Чем меньше сопротивление шунта по сравнению с внутренним сопротивлением амперметра, тем меньший ток проходит через прибор.

Поскольку падение напряжения на параллельно соединенных электрических ветвях одно и то же, для схемы с шунтом и амперметром (рис. 7.2) можно записать следующее равенство: $I_0 R_0 = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}}$, откуда $R_{\text{ш}} = I_0 R_0 / I_{\text{ш}}$.

В силу закона Кирхгофа полный ток в цепи равен $I = I_0 + I_{\text{ш}}$. Тогда, подставляя значение тока I , определим сопротивление шунта $R_{\text{ш}} = I_0 R_0 / (I - I_0)$, где I_0 – ток полного отклонения стрелки амперметра, R_0 – внутреннее сопротивление амперметра, I – измеряемый ток в цепи.

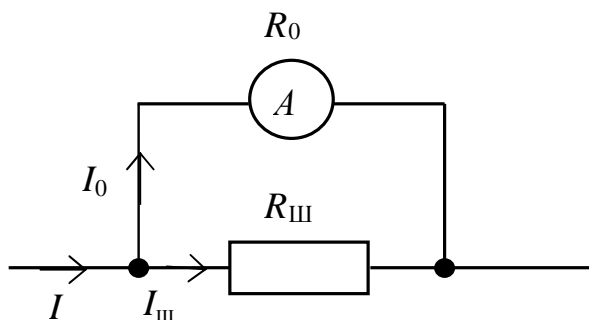


Рисунок 7.2 – Схема включения амперметра с шунтом

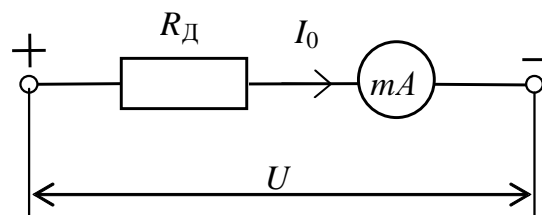


Рисунок 7.3 – Электрическая схема вольтметра

7.4.2 Измерение постоянного напряжения. Прибор для измерения напряжения называется *вольтметром*. Вольтметр для измерения постоянного напряжения состоит из стрелочного прибора магнитоэлектрической системы, последовательно с которым включено добавочное сопротивление (рис. 7.3).

Добавочное сопротивление R_d подбирается так, чтобы при предельном значении измеряемого напряжения стрелка прибора имела предельное отклонение. Величина добавочного сопротивления определяется по формуле

$$R_d = (U_{\Pi}/I_0) - R_o, \quad (7.8)$$

где U_{Π} – предельное значение измеряемого напряжения;

I_0 – ток полного отклонения прибора;

R_o – внутреннее сопротивление прибора.

При измерении напряжения вольтметр подключается параллельно участку электрической цепи, на котором измеряется напряжение.

7.5 Приборы электромагнитной системы

Приборы электромагнитной системы широко применяют в цепях постоянного и переменного тока. Их преимуществами являются простота конструкции, надежность и устойчивость к перегрузкам.

Принцип действия ЭИП электромагнитной системы основан на взаимодействии двух ферромагнитных сердечников, намагничивающихся под действием магнитного поля катушки, по которой протекает измеряемый ток.

Измерительный механизм электромагнитной системы с круглой катушкой показан на рисунке 7.4. Внутри катушки 2 с экраном 1 установлены два ферромагнитных секторных сердечника: подвижный 3, укрепленный на оси, и неподвижный 4.

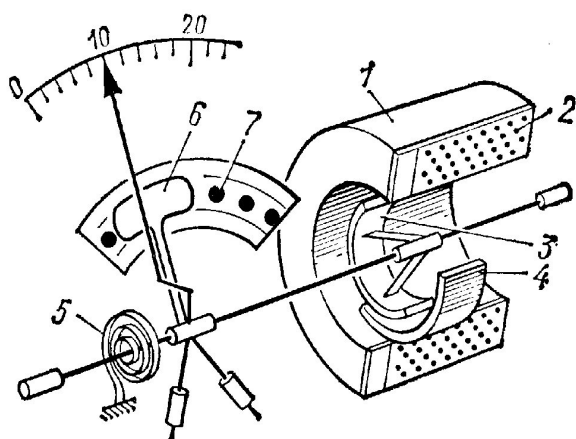


Рисунок 7.4 – Измерительный механизм электромагнитной системы

При протекании по катушке 2 измеряемого тока сердечники 3 и 4 намагничиваются одноименно, и поэтому отталкиваются друг от друга. Вследствие этого создается вращающий момент, и указательная стрелка прибора отклоняется на определенный угол.

Противодействующий момент создается пружиной 5. Магнитоиндуктивный успокоитель прибора имеет подвижный

алюминиевый сектор 6 и постоянные магниты 7.

Одновременно с измерительной стрелкой прибора при перемещении сектора 6 в нем индуцируются вихревые токи. В результате взаимодейст-

вия этих токов с магнитным полем постоянных магнитов 7 создается сила, тормозящая движение сектора 6.

Вращающий момент измерительного механизма прибора в цепи переменного тока пропорционален квадрату действующего значения тока $M_{вр} \approx C \cdot I^2$, поэтому **шкала прибора квадратичная**. Квадратичная шкала нелинейна, что является недостатком. Подбором формы ферромагнитных сердечников удастся получить шкалу, которая неравномерна только в начальной ее части.

Улучшения чувствительности, точности и срока службы ЭИП удалось достичь в результате разработки принципиально новой магнитной системы, перехода от керновых опор подвижных частей на крепление с помощью растяжек и внедрения новой конструкции жидкостного успокоителя. Например, унифицированный измерительный механизм имеет в 50 раз большую чувствительность по сравнению с другими типами приборов при одних и тех же габаритных размерах.

Конструкция унифицированного измерительного механизма показана на рисунке 7.5. Катушка 2 установлена на неподвижном магнитопроводе 3, на концах которого имеются две пары полюсных пластин 1 и 4. Пластины попарно образуют зазоры 6 и 7, в которых находится подвижный сердечник 5.

Электромагнитные приборы применяют для измерений в цепях постоянного и переменного токов в качестве амперметров и вольтметров.

Амперметры изготавливают однопредельными и многопредельными путем секционирования катушки. Вольтметры обычно выполняют на несколько пределов измерения с использованием ряда добавочных резисторов.

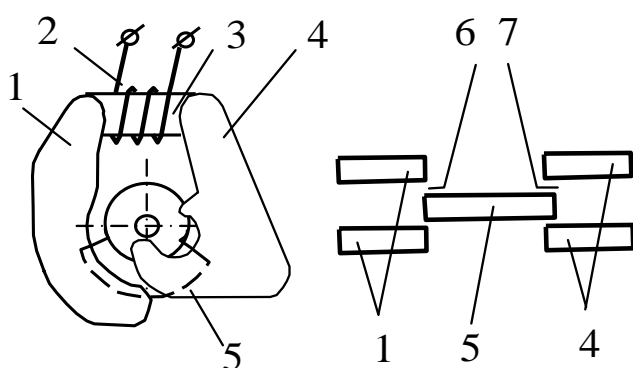


Рисунок 7.5 – Конструкция универсального измерительного механизма

Электромагнитные приборы являются одними из самых распространенных щитовых приборов для измерений в цепях переменного тока. Они просты по устройству и надежны, сравнительно хорошо переносят перегрузки. К недостаткам этих приборов следует отнести сравнительно невысокую точность, большое собственное потребление энергии (амперметры -

до 5 Вт, вольтметры - 1,5–12 Вт), ограниченный частотный диапазон, влияние на показания внешних магнитных полей.

Щитовые амперметры выпускаются классов 1,0; 1,5; 2,5 на токи до 300 А прямого включения (со встроенными трансформаторами тока) и

до 15 кА с наружными трансформаторами тока. Щитовые вольтметры тех же классов выпускаются на напряжения до 600 В прямого включения и до 450 кВ с трансформаторами напряжения.

7.6 Электродинамические и ферродинамические приборы

7.6.1 Электродинамические ЭИП. Принцип работы ЭИП электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек, по которым протекает измеряемый ток.

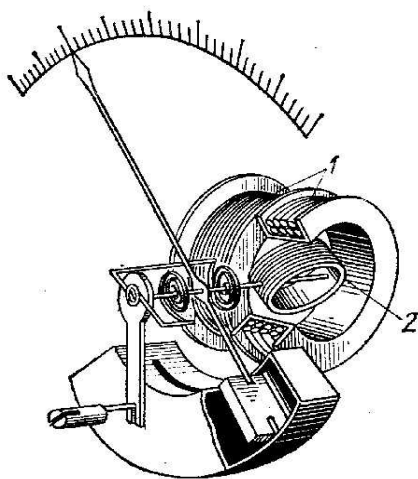


Рисунок 7.6 – Устройство ЭИП электродинамической системы

Электродинамический измерительный механизм (рис. 7.6) состоит из двух катушек: неподвижной 1 и подвижной 2. Катушка 2 укреплена на растяжках (или на осях) и может поворачиваться вокруг оси внутри двух секций неподвижной катушки. При наличии в катушках постоянных токов I_1 и I_2 возникают электромагнитные силы взаимодействия, стремящиеся повернуть катушку 2 соосно с катушкой 1. Возникает вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = k I_1 I_2. \quad (7.9)$$

При синусоидальных токах вращающий момент электродинамического измерительного механизма пропорционален произведению действующих значений токов в катушках I_1 и I_2 и косинусу угла сдвига фаз между ними $M_{\text{вр}} = k \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \delta$.

Электродинамические приборы используются в цепях постоянного и переменного тока в качестве амперметров, вольтметров и ваттметров.

7.6.2 Измерение мощности. Электродинамические ваттметры служат для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока. При использовании ваттметра в цепи постоянного тока (рис. 7.7) неподвижная катушка включается в цепь тока I , а подвижная катушка с последовательно соединенным добавочным резистором $R_{\text{д}}$ – параллельно нагрузочному устройству с сопротивлением $R_{\text{н}}$. В параллельной цепи ваттметра протекает ток $I_{\text{в}} = U/R_{\text{в}}$, где $R_{\text{в}}$ – сопротивление этой цепи $R_{\text{в}} = R_{\text{иВ}} + R_{\text{д}}$; $R_{\text{иВ}}$ – сопротивление обмотки напряжения прибора. Тогда, подставив в (7.9) $I_1 = I$, $I_2 = I_{\text{в}}$, получим

$$M = k I I_{\text{в}} = k U / R_{\text{в}}, \quad (7.10)$$

или

$$M = C U I = C P, \quad (7.11)$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, вращающий момент пропорционален мощности, потребляемой сопротивлением нагрузки R_H .

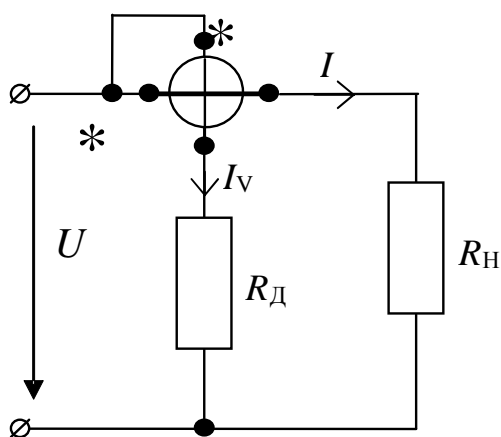


Рисунок 7.7 – Схема включения электродинамического ваттметра

жет поворачиваться подвижная катушка 2. В этом механизме создается более сильный вращающий момент, чем в электродинамическом, за счет наличия магнитопровода.

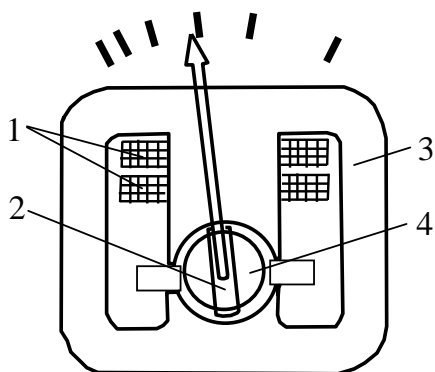


Рисунок 7.8 – Ферродинамический измерительный механизм

Схема включения ваттметра в цепь переменного тока аналогична схеме, показанной на рисунке 7.7.

7.6.3 Ферродинамические ЭИП.

Ферродинамический измерительный механизм (рис. 7.8) отличается от электродинамического более сильным магнитным полем, получаемым благодаря наличию магнитной системы, состоящей из магнитопровода 3 и неподвижного цилиндра 4. Неподвижная катушка 1 создает магнитное поле в зазоре, в котором мо

жет поворачиваться подвижная катушка 2. В этом механизме создается более сильный вращающий момент, чем в электродинамическом, за счет наличия магнитопровода.

Ферродинамические приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры) применяются в основном в цепях переменного тока в качестве щитовых и переносных приборов. Они отличаются меньшей восприимчивостью к внешним магнитным полям, большой чувствительностью и меньшим собственным потреблением энергии. К недостаткам ферродинамических приборов относится сравнительно низкая точность и ограниченный частотный диапазон.

7.7 Измерительные преобразователи

Измерительные преобразователи представляют собой многочисленную группу средств измерений, предназначенных для преобразования измеряемой физической величины X в удобную для фиксации величину (как правило, напряжение или ток) Y (рис. 7.9).

В электротехнике используют следующие преобразователи: шунты и добавочные сопротивления, измерительные трансформаторы тока и напряжения, преобразователи рода тока.

Шунты – это резисторы, включенные последовательно в цепь измеряемого тока и параллельно с измерительным механизмом. Изготавливаются из манганина.

Зажимы шунта, к которым подводится ток, называются токовыми зажимами, на схемах обозначаются (*). Зажимы, к которым подсоединяется измерительный механизм, называются потенциальными, на рисунке 7.10 обозначены (V).

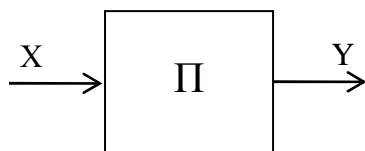


Рисунок 7.9 – Измерительный преобразователь

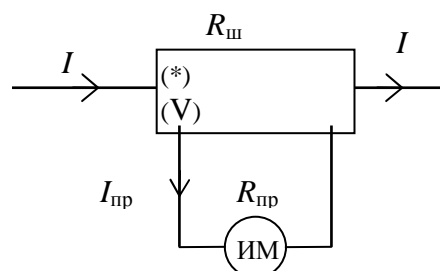


Рисунок 7.10 – Схема включения шунта

Шунты характеризуются номинальными значениями входного тока и выходного напряжения. Отношение номинального напряжения к номинальному току определяется номинальным сопротивлением шунтов.

Номинальный ток в цепи определяется по формуле:

$$I_{пр} = I \frac{R_{ш}}{R_{пр} + R_{ш}}, \quad I = I_{пр} \left(\frac{R_{пр}}{R_{ш}} + 1 \right) = I_{пр} \cdot p, \quad (7.12)$$

где $p = \frac{R_{пр}}{R_{ш}} + 1$ – коэффициент, который называется **шунтирующим множителем**. Показывает, во сколько раз измеряемый ток в цепи больше тока прибора или во сколько раз расширяется предел измерения по току

$$p = \frac{I}{I_{пр}}. \quad (7.13)$$

Из (7.12) можно получить соотношение для определения сопротивления шунта

$$R_{ш} = \frac{R_{пр}}{p - 1}. \quad (7.14)$$

Шунты бывают внутренние и наружные, однопредельные и многопредельные (см. рис. 7.11). По точности они делятся на классы: 0,02; 0,05; 0,16; 0,2; 0,5; 1.

Применяют шунты, как правило, в цепях постоянного тока. На переменном токе распределение тока в параллельных ветвях зависит от индуктивности и частоты, что вносит дополнительную погрешность в измерения.

Добавочные сопротивления применяют для расширения пределов измерения по напряжению. Их включают последовательно с измеряемым механизмом (рис. 7.12), что исключает влияние температуры на сопротивление прибора.

В соответствии с рисунком 7.10 можем записать

$$U = U_{\text{ИП}} + U_{\text{Д}} = I_{\text{ИП}}(R_{\text{ИП}} + R_{\text{Д}}). \quad (7.15)$$

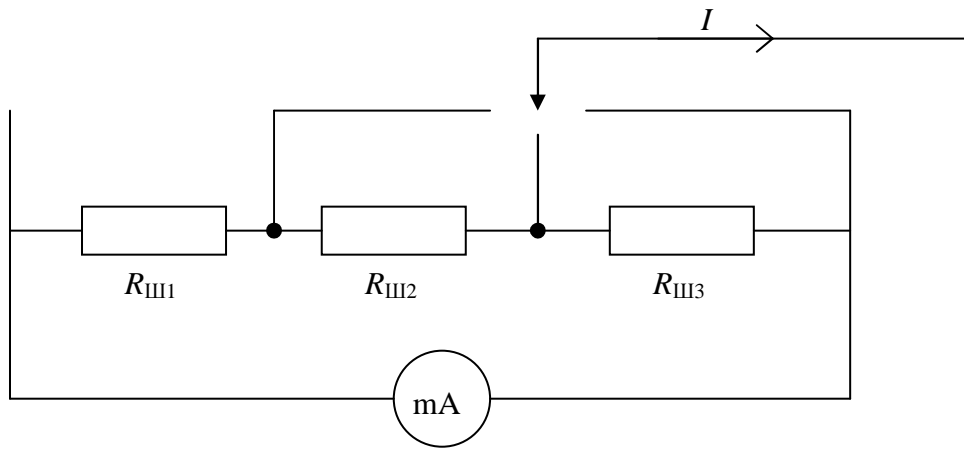


Рисунок 7.11 – Схема многопредельного шунта

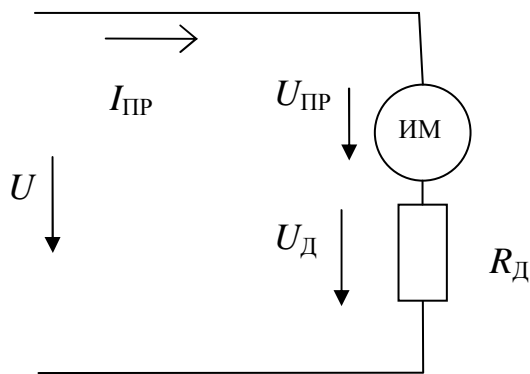


Рисунок 7.12 – Схема включения добавочного сопротивления

Из (7.15) можем определить значение добавочного сопротивления

$$R_{\text{Д}} = \frac{U - I_{\text{ИП}} \cdot R_{\text{ИП}}}{I_{\text{ИП}}} = R_{\text{ИП}}(p - 1), \quad (7.16)$$

где $p = U/U_{\text{ИП}}$ – коэффициент деления по напряжению.

Из (7.16) следует, что добавочное сопротивление должно быть в $(p - 1)$ раз больше сопротивления прибора.

Для получения многопредельных вольтметров часто применяют добавочные сопротивления, состоящие из нескольких резисторов (рис. 7.13).

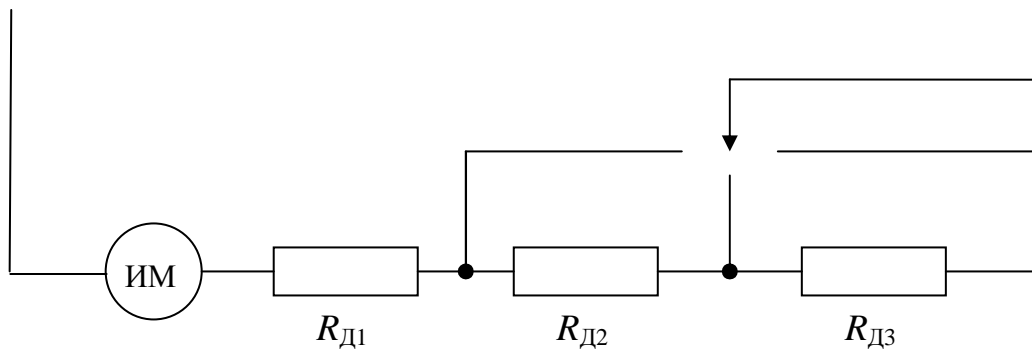


Рисунок 7.13 – Схема многопредельного добавочного резистора

По этому же принципу работают делители напряжения, т. е. от каждого резистора сделаны выводы, с которых можно снимать требуемое напряжение.

Добавочные сопротивления имеют классы точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 и изготавливаются на номинальные токи: 0,5; 1; 3; 5; 7; 15 А и на 30 мА.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения используются как преобразователи больших переменных токов и напряжений в относительно малые токи и напряжения (см. подраздел 9.6), допустимые для измерений приборами с небольшими стандартными номинальными значениями (например, 5 А, 100 В).

По схеме включения в измерительную цепь (см. рис. 7.14) и по условиям работы трансформаторы тока и напряжения отличаются друг от друга. У трансформаторов тока первичная обмотка включается в измерительную цепь последовательно. Первичная обмотка трансформатора напряжения включается в измерительную цепь параллельно. К вторичной обмотке присоединяются приборы: амперметр и вольтметр соответственно.

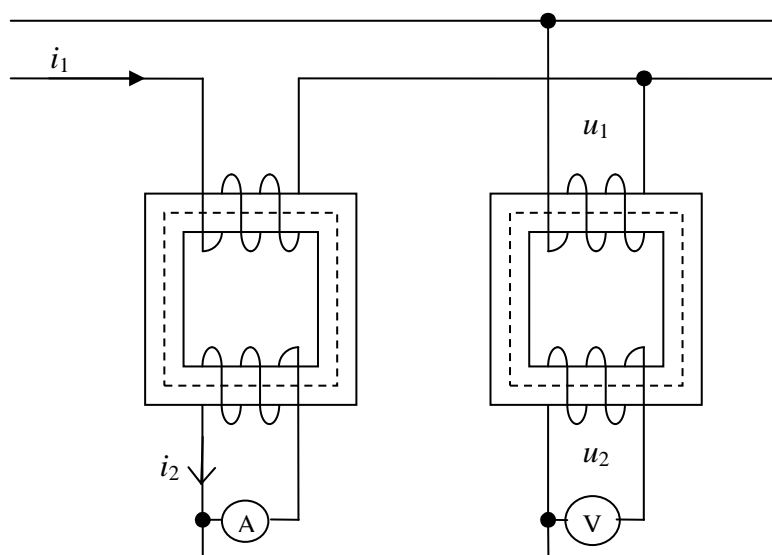


Рисунок 7.14 – Схемы включения трансформаторов тока и напряжения

По показаниям приборов, включенных во вторичные обмотки, можно определить значения измеряемых величин. Для этого необходимо их показания умножить на номинальные коэффициенты трансформации (указываются в паспортах трансформаторов):

для трансформатора тока

$$k_{I_H} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}, \quad (7.17)$$

и для трансформатора напряжения

$$k_{U_H} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}. \quad (7.18)$$

Действительные коэффициенты трансформации k_U и k_I зависят от значений сопротивлений вторичной цепи, напряжения и тока в первичной цепи. Из-за этого возникают погрешности по коэффициенту трансформации:

$$\delta_U = \frac{k_{U_H} - k_U}{k_U} \cdot 100\%, \quad \delta_I = \frac{k_{I_H} - k_I}{k_I} \cdot 100\%. \quad (7.19)$$

Измеряемые ток I_1 и напряжение U_1 определяются по формулам:

$$I_1 = k_{I_H} I_2, \quad U_1 = k_{U_H} U_2. \quad (7.20)$$

Автотрансформаторы используются для преобразования в цепях переменного тока одного переменного напряжения в другое (см. также подраздел 9.5). Они имеют одну обмотку, намотанную на сердечник. Обычно витки w_1 рассчитаны на напряжение 220 В. Часть витков в этой обмотке отделяются при помощи движка и являются витками вторичной обмотки w_2 . При движении движка напряжение изменяется от «0» до напряжения сети (см. рис. 7.15).

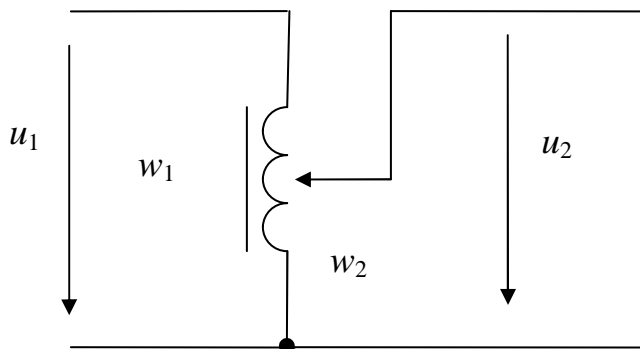


Рисунок 7.15 – Схема автотрансформатора

Выпрямительные преобразователи используются в ЭИП для преобразования переменного тока в постоянный (см. рис. 7.16) и изготавливаются на базе полупроводниковой техники.

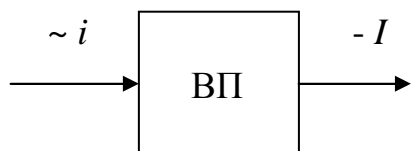


Рисунок 7.16 – Функциональная схема выпрямительного преобразователя

Основная характеристика выпрямительного преобразователя – коэффициент выпрямления k_B , который характеризует отношение прямого тока через диод к обратному.

$$k_B = \frac{I_{ПР}}{I_{ОБР}} = \frac{R_{ОБР}}{R_{ПР}}. \quad (7.21)$$

Коэффициент выпрямления зависит от величины напряжения, температуры окружающей среды, частоты выпрямленного переменного тока.

На рисунке 7.17 приведена зависимость коэффициента выпрямления от приложенного напряжения. При напряжении $U < U_{\min}$ выпрямление не происходит. При напряжении $U > U_{\max}$ происходит пробой диода.

Для германиевого диода $k_B = (4-5) \cdot 10^3$, для кремниевого диода $k_B = 10^5 - 10^6$.

Выпрямленный ток измеряется магнитоэлектрическими приборами. Полупроводниковый выпрямитель может включаться по схеме однополупериодного либо двухполупериодного выпрямления (см. подраздел 13.2).

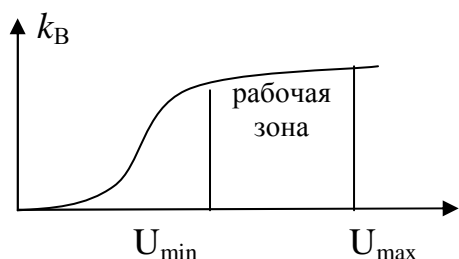


Рисунок 7.17 – Зависимость $k_B = f(U)$

Приборы с выпрямителями измеряют средние значения тока и напряжения.

Чтобы пересчитать средние значения в действующие значения, необходимо учесть коэффициент формы кривых тока и напряжения. Для уменьшения пульсации в цепях постоянного тока ставят фильтры: емкостные, индуктивные, комбинированные.

янного тока ставят фильтры: емкостные, индуктивные, комбинированные.

7.8 Электронные аналоговые электроизмерительные приборы

Электронные аналоговые ЭИП представляют собой средства измерений, в которых преобразование сигналов измерительной информации осуществляется с помощью аналоговых электронных устройств. Показания этих приборов являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины. Примером этой группы приборов являются электронные вольтметры.

В электронных вольтметрах измеряемое напряжение преобразуется с помощью аналоговых электронных устройств в постоянный ток, который подается на магнитоэлектрический измерительный механизм со шкалой, градуированной в единицах напряжения.

Различают вольтметры постоянного и переменного напряжений. Структурная схема электронного вольтметра постоянного напряжения представлена на рисунке 7.18, где ВхУ – входное устройство в виде высокоомного резистивного делителя напряжения, УПН – усилитель постоянного напряжения, МИП – магнитоэлектрический измерительный прибор.

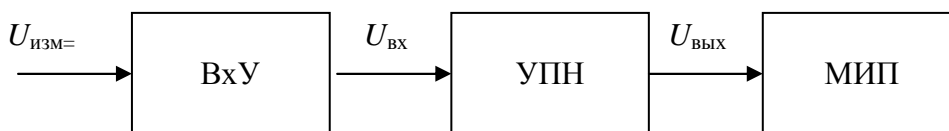


Рисунок 7.18 – Структурная схема электронного вольтметра постоянного напряжения

Входное устройство обеспечивает высокое входное сопротивление и значения измеряемого напряжения, необходимые для дальнейшего преобразования. УПН служит для увеличения чувствительности вольтметра и уси-

ления мощности измеряемого сигнала с целью приведения в действие магнитоэлектрического измерительного механизма.

Отличительной особенностью электронных вольтметров переменного напряжения является наличие преобразователя Пр (см. рис. 7.19) переменного напряжения в постоянное. В зависимости от того, какое значение переменного напряжения требуется измерить (среднее, действующее, амплитудное) различают соответственно преобразователи среднего, действующего и амплитудного значений переменного напряжения.

Достоинствами современных электронных вольтметров являются большое входное сопротивление (более 1 МОм), малое потребление мощности, высокая чувствительность, широкий диапазон измеряемых напряжений (от десятков нановольт на постоянном токе до десятков киловольт), широкий диапазон частот (от постоянного тока до сотен МГц).

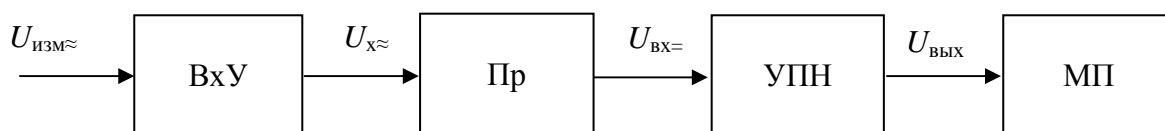


Рисунок 7.19 – Структурная схема электронного вольтметра переменного тока

7.9 Цифровые электроизмерительные приборы

Достижения в области полупроводниковой и микропроцессорной техники позволили наладить производство широкого парка цифровых измерительных приборов различного назначения. Они используются для измерения электрических и механических параметров в научных исследованиях, лабораторных и производственных условиях.

Цифровые измерительные приборы имеют ряд существенных преимуществ перед обычными (аналоговыми) приборами: высокую точность, возможность запоминания, передачи и ввода результатов измерений в автоматизированные измерительные комплексы и системы.

Принцип работы цифровых измерительных приборов построен на непрерывном преобразовании измеряемой величины в последовательность импульсов (цифровой код) с последующей обработкой этого цифрового кода. Непрерывное преобразование измеряемой величины осуществляется с помощью аналогово-цифровых преобразователей, для построения которых используют три метода: времяимпульсный, частотно-импульсный и метод следящего уравнивания.

В приборах времяимпульсного преобразования измеряемая величина преобразуется в пропорциональный интервал времени, измеряемый путем заполнения его последовательностью импульсов опорной частоты.

При частотно-импульсном преобразовании измеряемая величина пропорциональна частоте последовательности импульсов, определяемой подсчетом числа импульсов за калиброванный интервал времени.

Метод следящего уравнивания заключается в поочередном сравнении измеряемой величины с суммой образцовых дискретных величин, изменяющихся по определенному закону.

Выводы

1. Метрология изучает методы, способы и средства обеспечения единства получения требуемой точности измерений физических величин.

2. Преимуществами электрических методов измерения электрических и неэлектрических физических величин являются их высокая чувствительность, возможность автоматизации процесса измерения и малое потребление энергии при проведении измерений.

3. Измерение - это процесс, который состоит в сравнении измеряемой физической величины с некоторым ее значением, принятым за единицу.

4. Мерой называют средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного значения. К основным мерам электрических величин относятся меры ЭДС, электрического тока, электрического сопротивления, индуктивности, электрической емкости и др.

5. Электроизмерительные приборы подразделяются на приборы непосредственной оценки и приборы, работающие по методу сравнения. К первой группе относятся, в частности, наиболее распространенные приборы: амперметры, вольтметры, ваттметры.

6. Приборы непосредственной оценки подразделяются на системы в зависимости от того, на каком принципе создается вращающий момент в электроизмерительном механизме. Наиболее употребительные системы: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, индукционная.

7. Электроизмерительные приборы классифицируют по роду измеряемого тока, виду измеряемого параметра (ток, напряжение, мощность и т. д.), по способу представления измеряемой величины.

8. Для расширения пределов измерения амперметров и вольтметров используются добавочные сопротивления. В амперметре такое сопротивление (шунт) подключается параллельно сопротивлению прибора, в вольтметре - последовательно с сопротивлением прибора.

9. Измерительными преобразователями называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигнала электрической информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения.

10. Цифровые измерительные приборы по сравнению с аналоговыми имеют большие возможности в автоматизации технологических процессов, в программировании и учете энергетических ресурсов путем вывода результатов измерений на ЭВМ.

Вопросы для самопроверки

1. Что изучает наука метрология?
2. Охарактеризуйте суть процесса измерения.
3. Охарактеризуйте классификацию электроизмерительных приборов.
4. Охарактеризуйте функции комбинированных электроизмерительных приборов.
5. Что понимают под точностью электроизмерительного прибора?
6. Что понимают под погрешностью электроизмерительного прибора? Охарактеризуйте виды погрешностей.
7. Поясните, что представляет собой нормирующее значение электроизмерительного прибора?
8. Поясните, что представляет собой чувствительность электроизмерительного прибора?
9. Как включают в электрическую цепь амперметры и вольтметры?
10. Объясните устройство и принцип работы магнитоэлектрического электроизмерительного прибора.
11. Объясните устройство и принцип работы электромагнитного электроизмерительного прибора.
12. Объясните устройство и принцип работы электродинамического электроизмерительного прибора.
13. Чем отличаются ферродинамические электроизмерительные приборы?
14. Объясните принцип действия шунта, добавочных сопротивлений и делителей напряжения.
15. Объясните схемы включения измерительных трансформаторов тока и напряжения.
16. Охарактеризуйте достоинства электронных электроизмерительных приборов.
17. Какие преимущества имеют цифровые электроизмерительные приборы?

8 МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ключевые понятия: погрешность (систематическая, случайная, грубая, абсолютная, относительная, приведенная), чувствительность, класс точности ЭИП, прямые и косвенные измерения, метод непосредственной оценки, методы сравнения (нулевой, дифференциальный, замещения).

8.1 Погрешности и ошибки измерений

Под *погрешностью* понимают отклонение ожидаемого результата измерения от истинного значения. В зависимости от характера отклонения различают систематические, случайные и грубые погрешности.

Систематические погрешности изменяются закономерно, при повторных измерениях остаются постоянными и обнаруживаются только при проверке прибора.

Случайные погрешности обнаруживаются при повторных измерениях в виде разброса результатов.

Грубые погрешности дают резкое отличие от ожидаемого результата, и их не учитывают.

В зависимости от источника возникновения ошибки измерений делят на аппаратные, методические и субъективные.

Аппаратные или инструментальные ошибки зависят от погрешностей используемых средств измерений. *Методические или теоретические ошибки* появляются в силу несовершенства методов измерений, использования приближенных соотношений, положенных в основу выбранного метода измерения, не учёта влияния ряда факторов на точность измерения. *Субъективные ошибки* – это ошибки, вызванные несовершенством органов чувств оператора, его невнимательностью при проведении измерения.

В зависимости от значения измеряемой величины *ошибки* делятся на *аддитивные*, абсолютное значение которых не зависит от X , и *мультипликативные*, абсолютное значение которых пропорционально X .

Источниками аддитивной ошибки может быть смещение показателя приборов с нулевой отметки до проведения измерения, трение в опорах подвижных частей ЭИП, неточность градуировки шкалы. Причины мультипликативной ошибки – влияние внешних факторов (изменение температуры, внешних электромагнитных полей) и старение элементов и узлов ЭИП.

8.1.1 Погрешности измерений. Пределы допускаемых погрешностей ЭИП выражаются абсолютной, относительной и приведенной погрешностями.

Абсолютная погрешность – это разность между измеряемым и дей-

ствительным значением

$$\Delta X = X - X_d. \quad (8.1)$$

Абсолютная погрешность измеряется в единицах измеряемой величины и может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_d} = \frac{\Delta X}{X_d} \cdot 100\%. \quad (8.2)$$

Относительная погрешность характеризует точность измерения. Она выражается либо в относительных единицах, либо в процентах и может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

8.1.2 Погрешности средств измерений. Следует различать погрешности измерений и погрешности средства измерений, обусловленные его классом точности.

По способу выражения различают следующие погрешности средств измерения: абсолютные и относительные (аналогичные абсолютной (8.1) и относительной (8.2) ошибкам измерения), а также приведенные.

Абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком, называется поправкой

$$\Pi = -\Delta X = X_0 - X. \quad (8.3)$$

Приведенная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\%, \quad (8.4)$$

где X_N – нормирующее значение, которое обычно равно верхнему пределу шкалы или диапазону измерений, или длине шкалы и т. д.

Для большинства приборов $X_N = X_H$, где X_H – предел измерения ЭИП или номинальное значение измеряемой величины.

Как и относительная, приведенная погрешность может выражаться либо в относительных единицах, либо в процентах.

По признаку характера изменения различают систематические и случайные погрешности ЭИП, по признаку условий применения ЭИП – основные и дополнительные.

Основная погрешность возникает в ЭИП при нормальных условиях эксплуатации, установленных ГОСТ 2261–82: температура окружающей среды $20 \pm 5^\circ\text{C}$; атмосферное давление 750 ± 30 мм. рт. ст., относительная влажность $65 \pm 15\%$, напряжение питающей сети $220 \pm 4,4$ В для сети с частотой 50 Гц, нормальное положение шкалы прибора, отсутствие внешних электрических и магнитных полей, кроме земного, и т. д.

Дополнительные погрешности ЭИП возникают при отклонении влияющих величин (параметров, перечисленных выше) от нормальных значений.

Для характеристики средств и методов измерений применяется также понятие *чувствительности* – минимальное значение контролируемого параметра, на которое способен реагировать измерительный прибор.

8.1.3 Классы точности ЭИП. *Класс точности ЭИП* – это обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средства измерения, влияющими на точность, значение которых установлено в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Основные способы нормирования допускаемых погрешностей и обозначения класса точности приборов установлены ГОСТ 8.401-80. На шкале маркируют значение класса точности прибора в виде числа, указывающего нормирующее значение погрешности в %.

Для средств измерений, измеряющих электротехнические величины и имеющих верхние пределы, класс точности устанавливается по приведенной погрешности. Для средств измерений, не имеющих верхних пределов, класс точности устанавливается по относительной погрешности.

В соответствии с ГОСТ 8.401-80 средства измерения при определении класса точности делят на четыре основных группы.

1. Средства измерения, у которых преобладает аддитивная составляющая погрешности. Это показывающие и самопишущие приборы с аддитивной погрешностью от трения, изменения положения в пространстве и др. Для этой группы нормируется значение погрешности, выраженное в процентах (8.4), которое используется для обозначения класса точности.

Показывающие ЭИП имеют 8 классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 – лабораторные приборы; 1,0; 1,5; 2,5; 4 – технические приборы. Цифра, характеризующая класс точности, определяет выраженную в процентах максимальную, основную приведенную погрешность прибора. Чем меньше число, означающее класс точности, тем выше класс точности прибора.

Относительная погрешность ЭИП определяется соотношением

$$\delta = \pm \gamma \frac{X_H}{X}, \quad (8.5)$$

где γ – класс точности прибора.

Из выражения (8.5) следует, что относительная ошибка измерения, которая характеризует точность измерений, зависит не только от класса точности прибора, а и от того, на какой части шкалы выполняется измерение.

Любой показывающий ЭИП целесообразно использовать только в последней четверти шкалы прибора. В противном случае, даже у прибора

высокого класса точности относительная ошибка измерения может быть достаточно большой.

2. Средства измерения, в которых преобладает мультипликативная составляющая ошибки: делители напряжения, шунты, измерительные трансформаторы тока и напряжения и др. В этой группе нормируется предел относительно допустимой погрешности в процентах, а класс точности обозначается числом, размещенным в кружочке (например, $\textcircled{1,5}$ показывает, что относительная ошибка в какой либо точке не превышает $\pm 1,5\%$).

3. Средства измерений, в которых аддитивная и мультипликативная составляющие ошибки сравнимы. Это цифровые приборы, приборы сравнения с ручным и автоматическим уравниванием (мосты, компенсаторы). Для этой группы приборов предел относительной допустимой основной погрешности выражается соотношением

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_H}{X} - 1 \right) \right] \% , \quad (8.6)$$

где X_H – предел измерений;

X – измеряемая величина;

$d = \gamma_a = \Delta X_a / X_H \cdot 100\%$ – приведенное значение аддитивной составляющей погрешности, выраженной в процентах;

$c = \delta_m + \gamma_a$, причем $\delta_m = \Delta X_m / X_H \cdot 100\%$, – относительное значение мультипликативной составляющей погрешности в процентах;

c и d – постоянные числа;

отношение c/d – класс точности прибора, например 0,02/0,01. Первый его член c равен относительной погрешности средства измерения в оптимальных условиях, когда $X = X_H$, а второй член d характеризует увеличение относительной погрешности измерений при уменьшении X , то есть влияние аддитивной составляющей погрешности.

4. Средства измерений, в которых преобладает аддитивная составляющая ошибки, и которые имеют заметно выраженную неравномерную шкалу, например, гиперболическую или логарифмическую. В этом случае нормируется приведенное значение погрешности относительно размаха шкалы. Класс точности обозначается в виде числа, размещенного между двумя линиями, расположенными под углом, например $\swarrow 1,5 \searrow$. Цифра класса точности означает предел допустимой приведенной погрешности, выраженной в процентах, относительно шкалы прибора в миллиметрах.

8.2 Классификация методов электрических измерений

В зависимости от способа получения результата измерения подразделяют на два вида: прямые и косвенные.

Прямыми называют измерения, при которых искомое значение физической величины определяют непосредственно по показанию прибора (из-

мерение тока амперметром, электроэнергии счетчиком, напряжения вольтметром и др.).

Косвенными называют измерения, при которых искомое значение физической величины находят на основании известной функциональной зависимости между этой величиной и величинами, полученными в результате прямых измерений. Примером может служить определение электрического сопротивления по показаниям амперметра и вольтметра.

В зависимости от совокупности приемов использования принципов и средств измерений все методы делятся на методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Под методом непосредственной оценки понимают метод, при котором значение измеряемой величины определяют непосредственно по показанию отсчетного устройства измерительного прибора прямого действия (значение тока – по показанию амперметра, значение напряжения – по показанию вольтметра и др.).

Методом сравнения называют метод, при котором измеряемая величина в специальной измерительной цепи сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Методы сравнения подразделяют на нулевой, дифференциальный и замещения.

Нулевой метод – метод сравнения измеряемой величины с мерой, в котором результирующий эффект воздействия сравниваемых величин на прибор сравнения доводят до нуля.

Дифференциальный метод – метод сравнения, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой (например, измерение электрического сопротивления с помощью неуравновешенного моста).

Метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают в измерительной установке известной величиной, воспроизводимой мерой. При этом путем изменения известной величины добиваются такого же показания прибора, которое было при действии измеряемой величины (например, сравнение сопротивления резистора с сопротивлением образцовой катушки включением их попеременно в одно и то же плечо моста).

8.3 Измерительные схемы

Измерительные схемы и преобразователи применяются для определенного включения датчиков с целью измерения контролируемых величин и преобразования полученного сигнала в удобный для дальнейшего использования и обработки.

Как уже отмечалось, погрешность измерения зависит от класса точности измерительного прибора и от отношения значения величины, на которое рассчитан прибор, к действительному значению измеряемой величины.

Измерительные схемы характеризуются высокой *чувствительностью*. При измерении малых величин чувствительность метода измерения приобретает особое значение, часто определяя возможность самого измерения. Чувствительность метода измерения определяется из выражения

$$S = S_{\text{сх}} \cdot S_{\text{пр}}, \quad (8.7)$$

где $S_{\text{сх}}$ – чувствительность схемы;

$S_{\text{пр}}$ – чувствительность измерительного прибора.

Таким образом, повысить чувствительность метода измерения можно как повышением чувствительности измерительной схемы, так и выбором соответствующей измерительной аппаратуры.

На практике для повышения чувствительности измерений применяют мостовую, компенсационную и дифференциальную измерительные схемы.

8.3.1 Мостовая измерительная схема. Схема, имеющая четыре плеча, к одной диагонали которой подводится питающее напряжение, а с другой диагонали снимается выходное напряжение, называется мостовой измерительной схемой или просто мостом (рис. 8.1). Она используется для преобразования изменения сопротивления датчика в изменение величины или амплитуды напряжения. Сопротивление датчика (активное, индуктивное или емкостное) изменяется пропорционально изменению контролируемого технологического параметра, например температуры.

Применяются два основных типа мостовой схемы: а) равновесная, или балансная, мостовая схема, предполагающая нулевой метод измерения; б) неравновесная, или небалансная, мостовая схема, предполагающая измерение методом непосредственного отсчета по измерительному прибору, включенному в диагональ моста. Для измерения неэлектрических величин электрическими методами наиболее часто используют второй тип мостовой схемы. В тех случаях, когда задачей мостовой схемы является не измерение, а управление каким-либо процессом, в основном применяют первый тип мостовой схемы.

Мостовые схемы могут работать как на постоянном, так и на переменном токе.

В работе мостовой схемы важным моментом является условие равновесия, которое для схемы на постоянном токе (рис. 8.1) имеет вид

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (8.8)$$

При выполнении условия (8.8.) ток в диагонали моста $I_{\text{пр}} = 0$. В одно из плеч моста включается датчик, активное сопротивление которого изменяется пропорционально изменению контролируемого параметра. Условие баланса нарушается, и в диагонали моста bd через измерительный прибор проходит ток, величина которого пропорциональна величине контролируемого параметра.

В случае мостовой схемы, питаемой переменным током, условие равновесия имеет вид:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3, \quad (8.9)$$

где Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 - комплексные (полные) сопротивления плеч мостовой схемы.

Комплексные сопротивления Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 можно представить в следующем виде

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + j X_1; Z_2 = R_2 + j X_2; \\ Z_3 &= R_3 + j X_3; \\ Z_4 &= R_4 + j X_4, \end{aligned} \quad (8.10)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 - активные сопротивления ветвей схемы;

X_1, X_2, X_3, X_4 - реактивные сопротивления ветвей схемы.

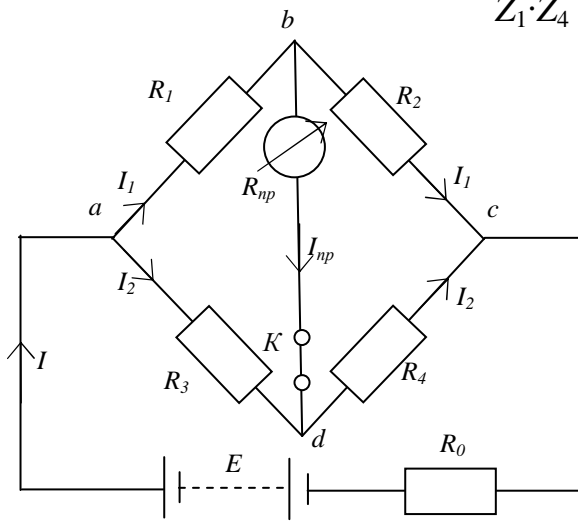


Рисунок 8.1 – Мостовая схема

Тогда условие равновесия (8.8) для схемы на переменном токе приобретает более сложный вид:

$$\left. \begin{aligned} R_1 R_4 - X_1 X_4 &= R_2 R_3 - X_2 X_3, \\ R_1 X_4 + R_4 X_1 &= R_2 X_3 + R_3 X_2. \end{aligned} \right\} \quad (8.11)$$

Трудность регулирования мостовой схемы на переменном токе заключается в том, что после выполнения условия равновесия (8.9) следует еще выполнить условие (8.11), не нарушая первого условия. Такое регулирование возможно только методом последовательных приближений, когда вначале добиваются минимальной силы тока, регулируя один параметр, затем добиваются еще большего уменьшения i_{np} , регулируя другой параметр, и т. д., последовательно уменьшая i_{np} до нуля.

Регулирование равновесного моста на переменном токе упрощается в следующих случаях:

1. При наличии только реактивных сопротивлений, когда активные сопротивления равны нулю (что возможно только при применении конденсаторов). В данном случае остается только одно условие равновесия

$$X_1 \cdot X_4 = X_2 \cdot X_3. \quad (8.12)$$

2. Если в плечи моста включены только активные сопротивления. Тогда условие равновесия определяется только равенством

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (8.13)$$

3. Если два соседних плеча имеют только активное, а два других – только реактивное сопротивление (что возможно при применении конденсаторов). В данном случае остается только одно условие:

$$X_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot X_3, \quad (8.14)$$

если $R_1 = R_3 = X_2 = X_4 = 0$.

Чувствительность равновесной мостовой схемы при переменном сопротивлении R по току определяется из выражения

$$S''_{cx} = \Delta i_{пр} / \Delta R_1 = i \cdot R_4 / N = U \cdot R_4 / M, \quad (8.15)$$

и по напряжению

$$S''_{cx} = \Delta U_{пр} / \Delta R_1 = \Delta i_{пр} \cdot R_{пр} / \Delta R_1 = i \cdot R_{пр} \cdot R / N = U \cdot R_{пр} \cdot R_4 / M, \quad (8.16)$$

где ΔR_1 – изменение сопротивления R_1 (одного из плеч);

M, N – сопротивление плеч, зависящее от способа включения датчиков;

U – напряжение питания мостовой схемы;

i – сила тока, потребляемая мостовой схемой от источника питания.

Таким образом, **повышение чувствительности мостовой схемы может происходить за счет увеличения напряжения питания и способов включения датчиков.**

8.3.2 Компенсационная схема. Принцип компенсации заключается в том, что измеряемую ЭДС (или напряжение) уравнивают равным и противоположным по знаку падением напряжения, значение которого может быть установлено и определено с высокой точностью. Уравновешивающее падение напряжения снимается с потенциометра (реохорда) и фиксируется положением движка (рис. 8.2).

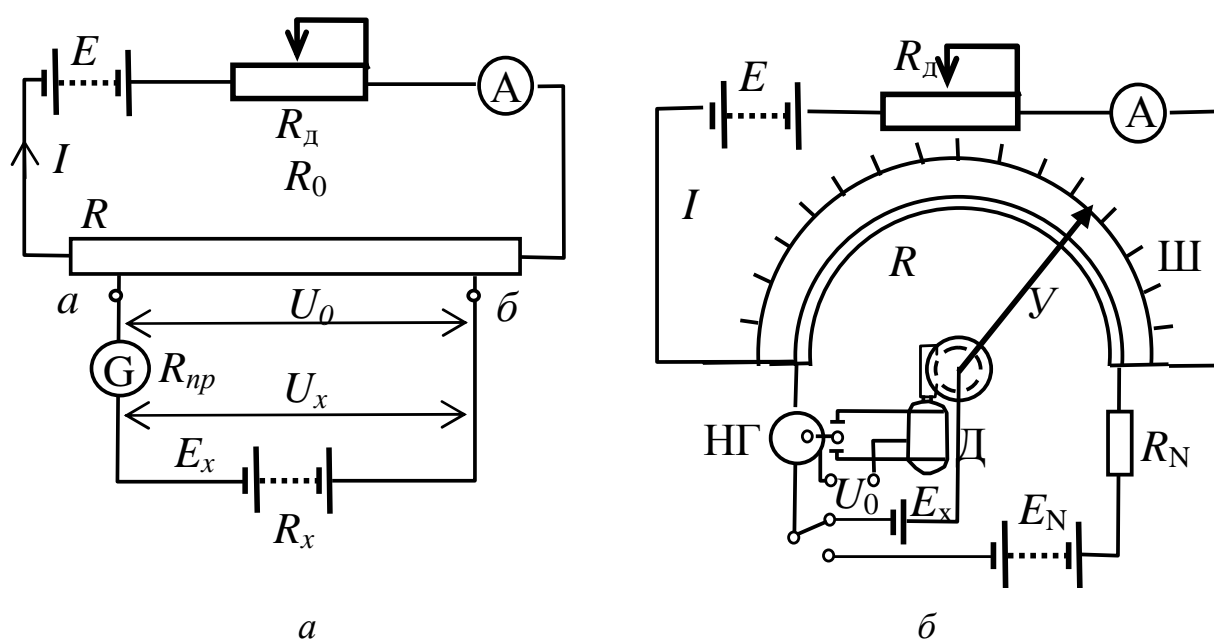


Рисунок 8.2 – Компенсационная измерительная схема

Движок устанавливают либо вручную, проверяя показания по гальванометру (рис. 8.2, *а*), либо он устанавливается автоматически посредством электродвигателя *Д*, управляемого гальванометром *НГ* (рис. 8.2, *б*). Последняя схема называется автокомпенсационной, и ее применяют почти во всех приборах, работающих по компенсационному методу.

Подвижная система нулевого гальванометра *НГ* (рис. 8.2, *б*) имеет вместо стрелки контакт, который при появлении в гальванометре тока в зависимости от его направления замыкается с верхним или нижним неподвижным контактом *К*. При этом включается электродвигатель *Д* и перемещает движок реохорда *R_д* до тех пор, пока сила тока в гальванометре опять не станет равной нулю. Тогда контакты разомкнутся, электродвигатель остановится, и движок реохорда останется в положении, соответствующем условию компенсации до тех пор, пока измеряемая ЭДС опять не изменит своего значения. Тогда описанный процесс повторится, и движок переместится в новое положение, соответствующее новому положению компенсации. Перемещение движка механически передается на указатель *У*, показывающий по шкале *Ш* значение измеряемой ЭДС, или на каретку с пером записывающего механизма (или на то и другое одновременно).

Условие компенсации может быть записано как:

$$\Delta i_{пр} = (U_x - U_0) / (R_{аб} + R_x + R_{пр}) = 0, \quad (8.17)$$

т. е. $U_x - U_0 = 0$, откуда $U_x = U_0 = i \cdot R_x$, где $i = \text{const}$. Напряжение U_x (ЭДС термопары) в момент компенсации всегда пропорционально R_0 , а значит и перемещению движка.

8.4 Измерение тока и напряжения

Как было отмечено в подразделе 7.4.1, для измерения тока в каком-либо элементе цепи (рис. 8.3, *а*) последовательно с ним включают измеритель тока - амперметр (рис. 8.3, *б*).

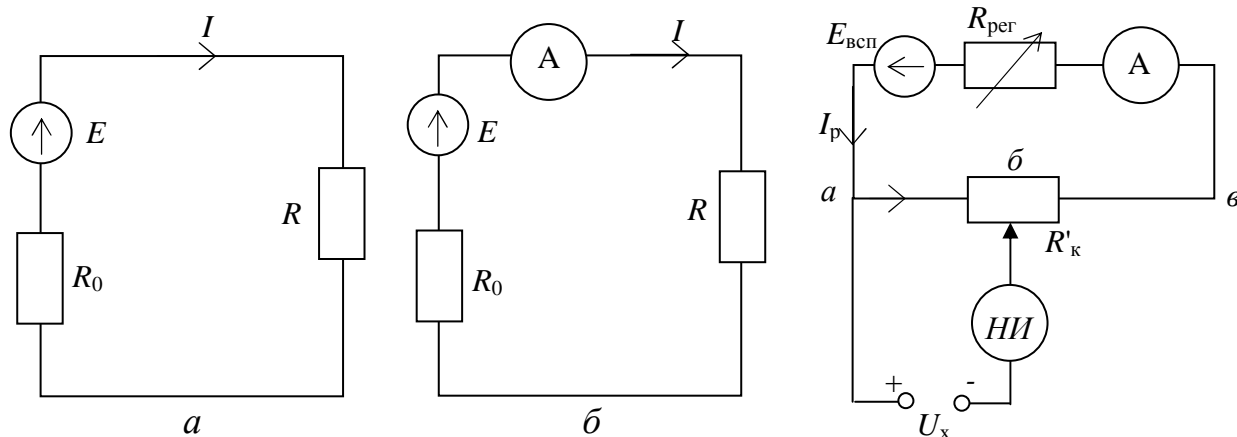


Рисунок 8.3 – Измерение тока в цепи амперметром

Рисунок 8.4 – Косвенное измерение тока компенсационным методом

При измерении малых постоянных токов (менее 10^{-3} А) используют прямые и косвенные методы измерения. В первом случае ток измеряют стрелочными магнитоэлектрическими приборами, для увеличения чувствительности которых обычно применяют усилители постоянного тока.

Более точным является косвенное измерение тока, при котором в измеряемую цепь включают образцовый резистор с сопротивлением R_N , и на нем измеряют падение напряжения компенсационным методом. На рисунке 8.4 показана принципиальная схема измерения неизвестного напряжения U_X компенсационным методом. В верхнем контуре под действием ЭДС вспомогательного источника питания $E_{всп}$ создается рабочий ток I_p . Его значение регулируется резистором $R_{рег}$ и измеряется амперметром A . В нижнем контуре измеряемое неизвестное напряжение U_X уравнивается падением напряжения на компенсирующем резисторе R'_k путем изменения положения движка $б$. При компенсации, когда $U_X = R'_k I_p$, ток в нулевом индикаторе $НИ$ становится равным нулю, что соответствует бесконечно большому входному сопротивлению измерительного устройства.

Компенсационная измерительная цепь работает без отбора энергии от объекта измерения. Зная R'_k и I_p , можно определить U_X .

Устройства, реализующие компенсационный метод измерения (см. подраздел 8.3.2), называют потенциометрами. В последних рабочий ток устанавливается не по амперметру, а компенсационным методом с использованием нормального элемента, ЭДС $E_{нэ}$ которого известна с высокой степенью точности (рис. 8.5). Регулировкой сопротивления резистора $R_{рег}$ добиваются отсутствия тока в нулевом индикаторе $НИ$ (переключатель в положении 1). В этом случае справедливо равенство

$$R_N \cdot I_p = E_{нэ}, \quad (8.18)$$

где R_N - сопротивление образцового резистора.

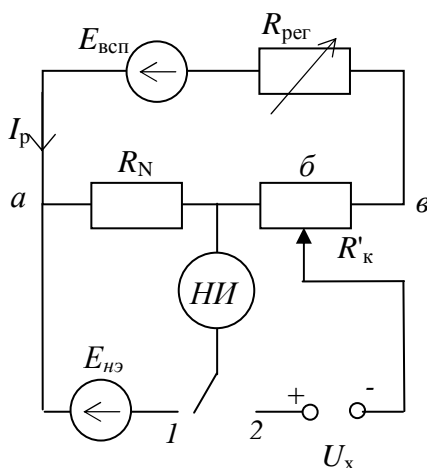


Рисунок 8.5 – Схема потенциометра

Поскольку ЭДС нормального элемента и сопротивление R_N известны с высокой точностью, значение тока $I_p = E_{нэ}/R_N$ также известно с высокой точностью.

При положении переключателя 2 измеряемое напряжение U_X сравнивается с компенсирующим напряжением U_K , создаваемым током I_p в компенсирующем резисторе R'_k . При отсутствии тока в $НИ$ напряжение U_X уравновешено напряжением U_K , т. е.

$$U_X = U_K = R'_k \cdot I_p = \frac{R'_k}{R_N} E_{нэ}. \quad (8.19)$$

Из (8.19) видно, что точность измерения U_x , при таком методе измерений определяется точностью величины U_k , точностью его сравнения с U_x , т. е. чувствительностью $НИ$, неизменностью рабочего тока I_p - стабильностью $E_{всп}$. В свою очередь, точность U_k зависит от точности изготовления резисторов R_k . Последние в современных потенциометрах выполняют в виде высокостабильных многодекадных магазинов сопротивления. Выпускаемые промышленностью потенциометры имеют классы точности: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Максимальное напряжение, измеряемое потенциометром непосредственно, составляет 2,12111 В.

Постоянные токи порядка 10^{-3} – 10^2 А измеряют также прямыми и косвенными методами. При прямых измерениях используют миллиамперметры и амперметры магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем, а также электронные аналоговые и цифровые приборы. При косвенных измерениях ток определяют по измеряемому падению напряжения на образцовом резисторе с помощью потенциометров постоянного тока и цифровых вольтметров.

Измерение больших постоянных токов (свыше 100 А) обычно осуществляют амперметрами магнитоэлектрической системы с использованием шунтов (рис. 7.2).

При измерении переменных токов необходимо помнить, какое значение тока измеряется конкретным прибором: действующее, амплитудное или среднее. Это вызвано тем, что все приборы, как правило, градуируют в действующих значениях синусоидального тока, а подвижные части измерительных механизмов различных систем реагируют на значения величин, отличные от действующих.

Переменные токи до 100 мкА обычно измеряют цифровыми микроамперметрами, токи свыше 100 мкА - выпрямительными микроамперметрами. Для измерения переменных токов в диапазоне 10 мА...100 А используют электромагнитные, электродинамические и выпрямительные приборы, работающие в частотном диапазоне до десятков килогерц, и термоэлектрические приборы в диапазоне частот до сотен мегагерц. Измерение больших переменных токов осуществляют теми же приборами, но с использованием измерительных трансформаторов тока (рис. 7.14).

Переменные токи измеряют и косвенным путем. В этом случае образцовый резистор включают последовательно в измерительную цепь, а падение напряжения на нем измеряют с помощью вольтметров. Точность измерения при этом возрастает, но по отношению к точности измерения на постоянном токе она ниже.

При прямом и косвенном измерениях тока включение в измеряемую цепь измерителя с внутренним сопротивлением R_A изменяет режим работы исследуемой цепи. На рисунке 8.3 показаны схемы цепи до и после включения амперметра. Ток I после включения измерителя становится равным I_A . От-

носительное измерение тока в этом случае характеризуют **погрешностью метода измерения или методической погрешностью измерения тока**:

$$\delta_I = \frac{-1}{1 + R_{BX.A} / R_A}, \quad (8.20)$$

т. е. **включение амперметра уменьшает измеряемый ток на значение, зависящее от отношения $R_{BX.A} / R_A$** .

Как было отмечено в подразделе 7.4.2, для измерения ЭДС и напряжения U на каком-либо участке электрической цепи (рис. 8.6, а) измеритель напряжения включают параллельно этому участку (рис. 8.6, б).

При измерении малых постоянных напряжений (порядка 10^{-7} – 10^{-8} В) используют магнитоэлектрические гальванометры. Более точные результаты при измерении напряжений в диапазоне 1-1000 мкВ получают с помощью потенциометров постоянного тока и цифровых микровольтметров.

Значения постоянных напряжений от десятков милливольт до сотен вольт измеряют приборами магнитоэлектрической, электродинамической, электромагнитной систем, электронными аналоговыми и цифровыми вольтметрами, потенциометрами постоянного тока с использованием добавочных резисторов и делителей напряжения. Для измерения постоянных напряжений до нескольких киловольт применяют в основном электростатические вольтметры, а также приборы других систем с делителями напряжения.

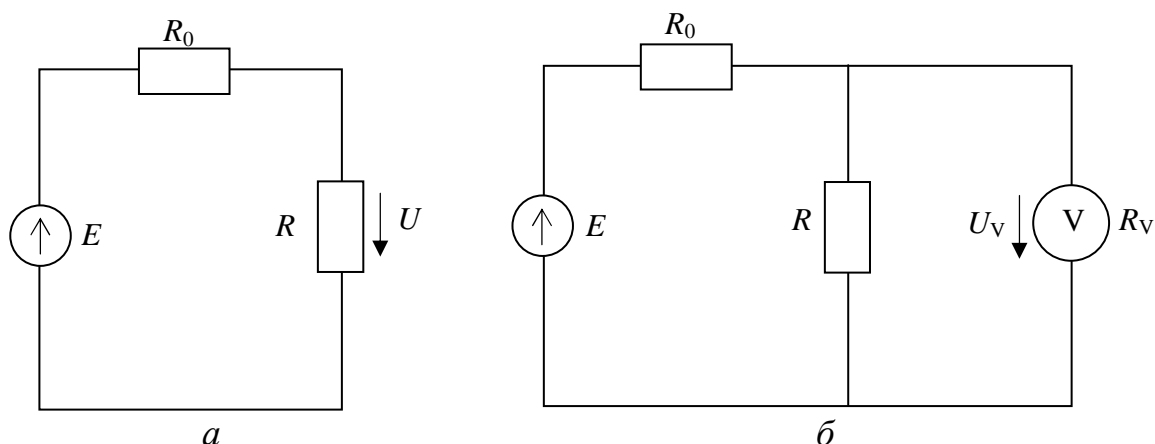


Рисунок 8.6 – Измерение напряжения вольтметром

Малые переменные напряжения (до единиц вольт) измеряют с помощью приборов выпрямительной системы, аналоговыми электронными вольтметрами. Более высокую точность получают при измерении напряжений потенциометрами переменного тока, цифровыми вольтметрами.

Для измерения переменных напряжений от единиц до сотен вольт в диапазоне частот до десятков килогерц используют приборы электромагнитной, электродинамической и выпрямительной систем, потенциометры переменного тока. В диапазоне частот до десятков мегагерц измерение напряжений производят приборами электростатической и термоэлектрической систем, цифровыми вольтметрами.

Для измерения больших переменных напряжений используют те же приборы, но с применением измерительных трансформаторов напряжения (см. рис. 7.14). Измерительные трансформаторы кроме преобразования переменного напряжения, изолируют вторичную цепь от первичной, находящейся под высоким напряжением.

При подключении измерителя напряжения к участку электрической цепи с сопротивлением R (рис. 8.6), изменяется режим ее работы. Напряжение на данном участке становится равным U_V . Относительное изменение напряжения характеризуют **погрешностью метода измерения или методической погрешностью измерения напряжения**:

$$\delta_V = \frac{-1}{1 + R_V / R_{BX.V}}, \quad (8.21)$$

т. е. включение вольтметра уменьшает измеряемое напряжение на значение, зависящее от отношения $R_V / R_{BX.V}$. Отметим, что **измерение напряжения потенциометром не имеет методической погрешности измерения напряжения**.

В настоящее время широкое распространение получили автоматические потенциометры, использующие компенсационный метод измерения и широко применяемые для измерения неэлектрических величин, предварительно преобразованных в напряжение.

8.5 Измерение мощности и электрической энергии

Измерение мощности осуществляют с помощью прямого и косвенного методов. При прямом методе используют ваттметры, при косвенном – амперметры и вольтметры.

8.5.1 Измерение мощности в цепях постоянного тока. В цепях постоянного тока мощность измеряют методом амперметра-вольтметра. Измерив амперметром ток I и вольтметром напряжение U (см. рис. 8.7), вычисляют мощность приемника

$$P = U \cdot I. \quad (8.22)$$

Для уменьшения погрешности из-за влияния внутренних сопротивлений приборов схему (рис. 8.7, а) следует использовать при малых значениях сопротивления R , а схему (рис. 8.7, б) – при больших R .

Измерение мощности ваттметром в цепях постоянного тока производят редко.

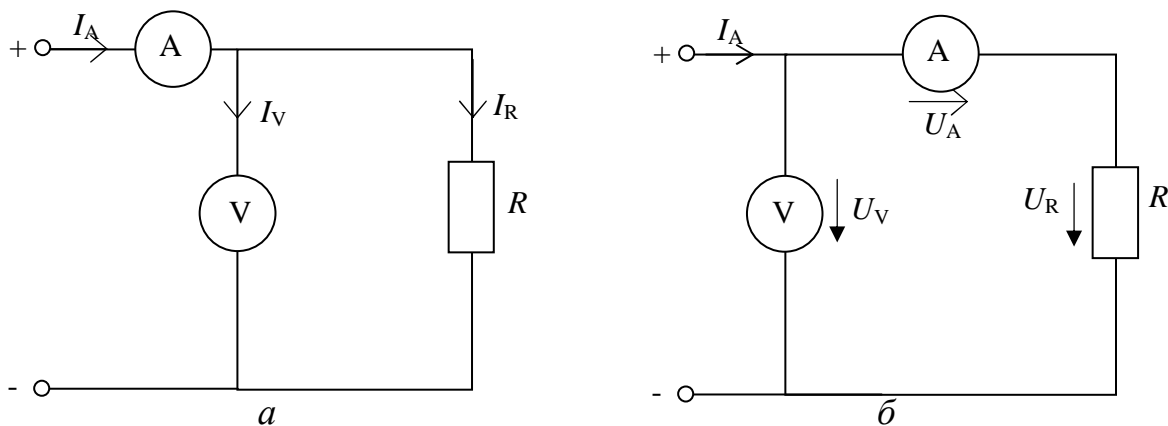


Рисунок 8.7 – Измерение мощности методом амперметра-вольтметра

8.5.2 Измерение мощности в цепях однофазного тока. Полную мощность приемника измеряют, как правило, методом амперметра-вольтметра:

$$S = U \cdot I, \quad (8.23)$$

где U и I – действующие напряжение и ток.

Активную $P = U \cdot I \cos \varphi$ и реактивную $Q = U \cdot I \sin \varphi$ мощности приемников измеряют с помощью ваттметров и варметров. В качестве ваттметров применяют электродинамические и ферродинамические приборы, в качестве варметров – электродинамические приборы.

Схема включения ваттметра для измерения активной мощности в цепях однофазного переменного тока показана на рисунке 7.7.

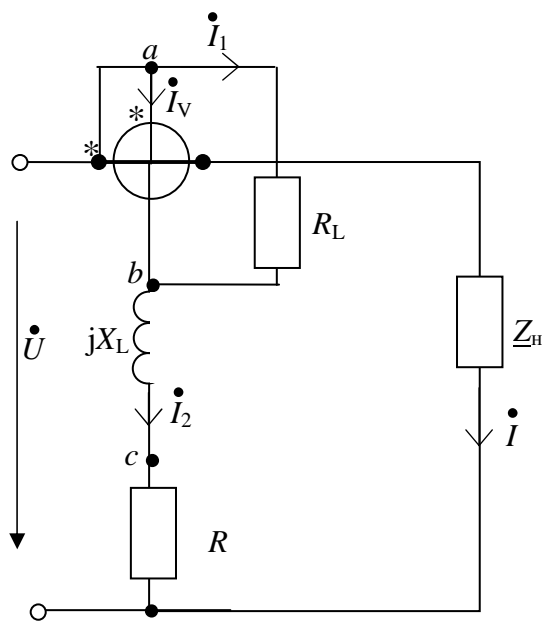


Рисунок 8.8 – Схема включения варметра

Измерение реактивной мощности в однофазных цепях проводят с помощью реактивных ваттметров, называемых варметрами. В этих приборах схемным путем создается искусственный сдвиг фаз на 90° между напряжением U на приемнике и током в обмотке напряжения прибора I_V (рис. 8.8). Из схемы рис. 8.8 видно, что последовательно с параллельной обмоткой R_{WV} прибора и добавочным резистором R_1 включена индуктивная катушка с сопротивлением X_L , а параллельно к этой обмотке (зажимы a и b) подключен резистор с сопротивлением R_L . Тогда ток $\dot{I}_V = \dot{I}_2 - \dot{I}_1$ при соответствующем подборе парамет-

ров $X_L \ll (R_{WV} + R) = R_V$ оказывается сдвинутым по фазе относительно напряжения ровно на 90° . В результате вращающий момент получается пропорциональным $\sin\varphi$ (где φ - угол сдвига фаз между напряжением и током электроприемника), т. е. вращающий момент пропорционален реактивной мощности $Q = U \cdot I \sin\varphi$.

8.5.3 Измерение мощности в трехфазных цепях. Мощность трехфазной системы равна сумме мощностей, потребляемых нагрузками каждой фазы:

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (8.24)$$

В случае равномерной нагрузки общая активная мощность равна утроенной мощности какой-либо фазы:

$$P = 3P_\Phi = 3I_\Phi \cdot U_\Phi \cdot \cos\varphi, \quad (8.25)$$

где I_Φ и U_Φ – фазные ток и напряжение.

Если фазные значения тока и напряжения выразить через линейные, то получим:

$$P = \sqrt{3}U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (8.26)$$

где I и U – линейные ток и напряжение.

Измерение активной мощности. Для измерения активной мощности трехфазной системы применяют различные способы.

Способ одного ваттметра применяют для измерения мощности при симметричной нагрузке в четырехпроводной или трехпроводной линии, если доступна для подключения нейтральная (нулевая) точка нагрузки (рис. 8.9). При этом общая мощность равна утроенному показанию ваттметра:

$$P = 3I_\Phi \cdot U_\Phi \cdot \cos\varphi. \quad (8.27)$$

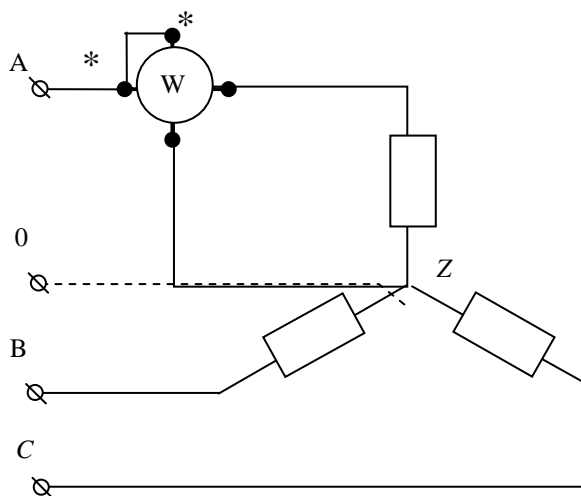


Рисунок 8.9 – Способ одного ваттметра

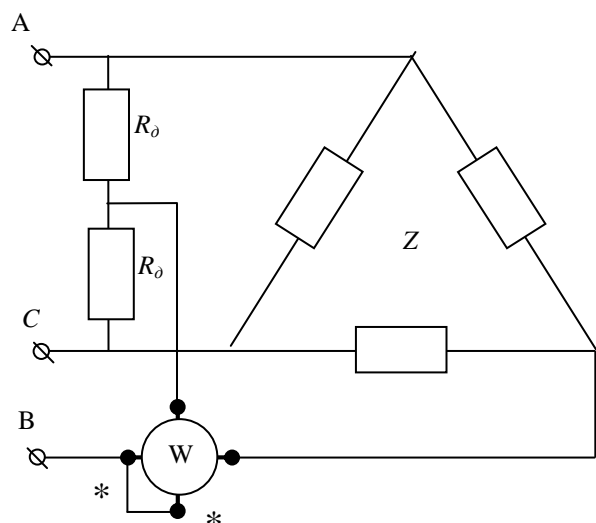


Рисунок 8.10 – Способ одного ваттметра с искусственной нулевой точкой

Способ одного ваттметра с созданием искусственной нулевой точки применяют для измерения мощности при симметричной нагрузке в тех случаях, когда нулевая (нейтральная) точка электроприемника недоступна или вообще отсутствует (например, в соединении треугольником). При этом в одну из фаз включают токовую обмотку ваттметра, а нулевую (нейтральную точку) получают включением двух одинаковых сопротивлений R_0 между двумя другими фазами (рис. 8.10). В этом случае общая мощность равна утроенному показанию ваттметра.

Способ трех ваттметров применяют для измерения мощности при неравномерной нагрузке в четырехпроводной линии (рис. 8.11). Общая мощность при этом равна сумме показаний всех трех ваттметров.

Способ двух ваттметров может быть применен в трехпроводных линиях во всех случаях при измерении мощности трехфазных приемников (рис. 8.12). По этой схеме токовые обмотки ваттметров включают в какие-либо две фазы, а обмотки напряжения между третьей (незанятой) фазой и той фазой, в которую включена токовая обмотка данного ваттметра. Общая мощность при этом равна сумме показаний обоих ваттметров.

Нужно иметь в виду, что при сдвиге фаз более 60° (работа многих электрических машин в режиме холостого хода) стрелка первого ваттметра отклонится в обратную сторону от нуля. Для отсчета отрицательных значений мощности по первому ваттметру переключают зажимы одной из его обмоток (токовой или обмотки напряжения), и общая мощность в этом случае равна разности показаний ваттметров

$$P = P_2 - P_1. \quad (8.28)$$

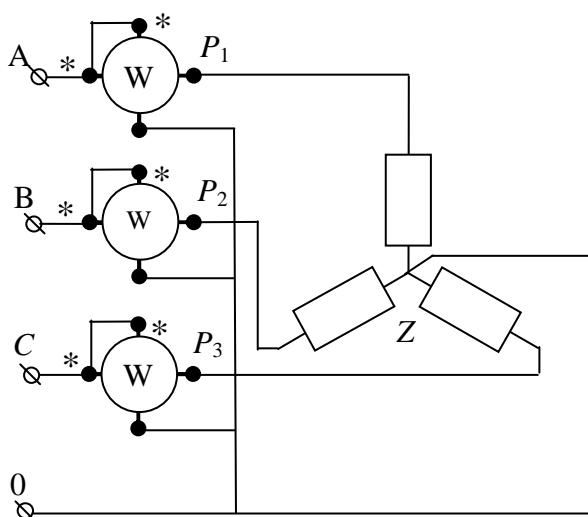


Рисунок 8.11 – Способ трех ваттметров

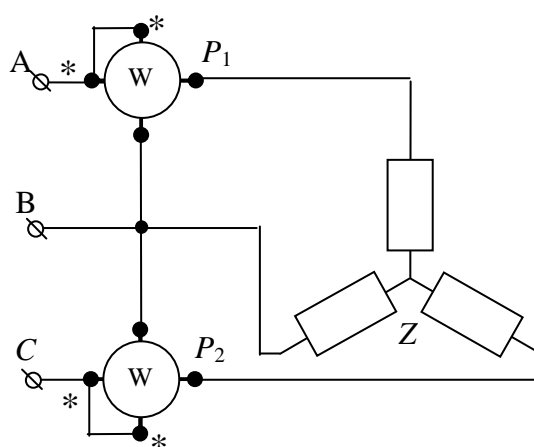


Рисунок 8.12 – Способ двух ваттметров

Пользуясь методом двух ваттметров при равномерной нагрузке, можно по показаниям приборов вычислить $\operatorname{tg} \varphi$, а затем φ и $\cos \varphi$.

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}. \quad (8.29)$$

Метод двух ваттметров широко применяют на практике. Однако гораздо удобнее измерять мощность трехфазных приемников двухэлементным трехфазным ваттметром, в котором объединены два однофазных ваттметра, воздействующих вращающимися моментами на ось, общую для обеих измерительных систем.

Измерение реактивной мощности. Для измерения реактивной мощности трехфазной системы при равномерной нагрузке можно пользоваться одним ваттметром активной мощности, при этом токовую обмотку включают в одну из фаз, а обмотку напряжения - между двумя другими фазами (рис. 8.13, а).

Векторная диаграмма (рис. 8.13, б) объясняет принцип измерения реактивной мощности для данного случая. Мощность, измеренная ваттметром будет определяться следующим соотношением

$$P = I_A \cdot U_{BC} \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = I_L \cdot U_L \cdot \sin \varphi. \quad (8.30)$$

Умножив показания ваттметра на $\sqrt{3}$, получают общую реактивную мощность трехфазной цепи

$$Q = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (8.31)$$

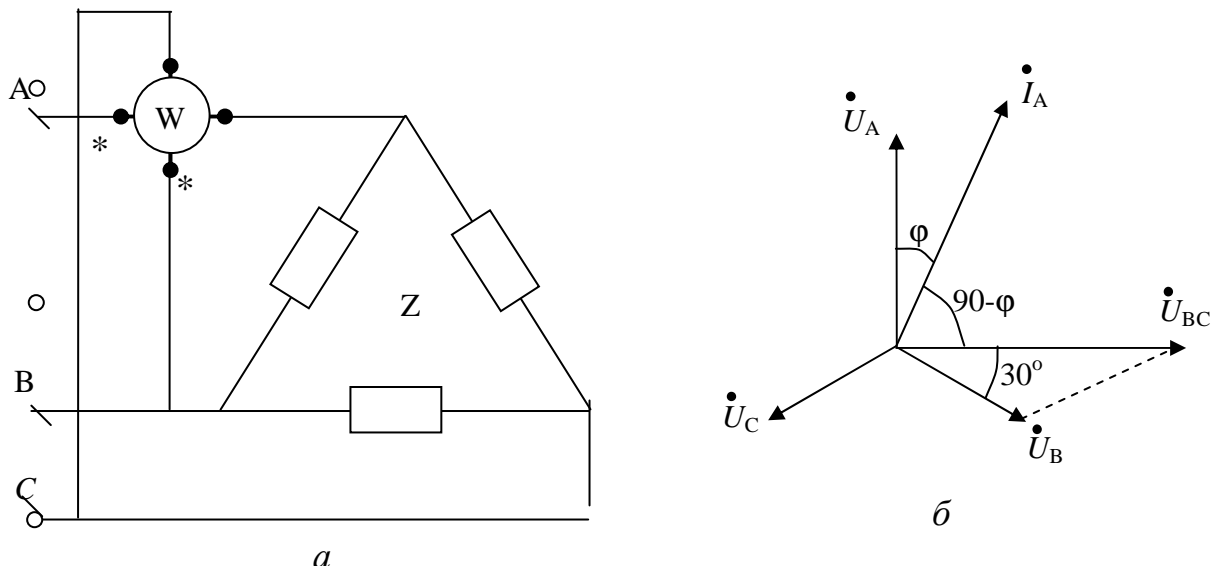


Рис. 8.13 - Измерение реактивной мощности одним ваттметром

На практике применяют трехфазные реактивные ваттметры, работающие по схеме двух ваттметров (рис. 8.14).

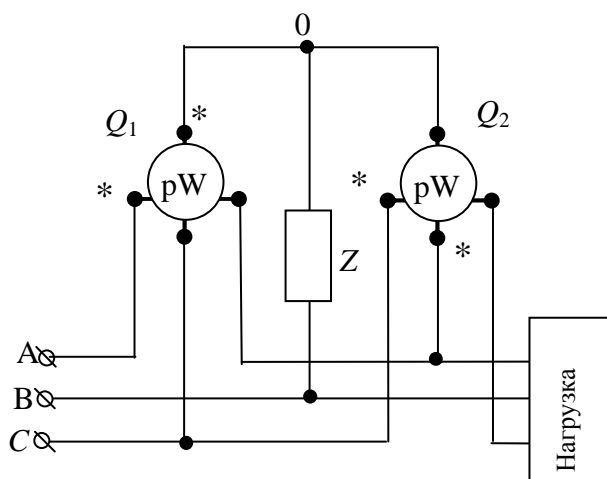


Рисунок 8.14 – Измерение реактивной мощности трехфазного электропотребителя

Для включения обмоток напряжения на фазное напряжение здесь создана искусственная нулевая точка 0, образованная сопротивлениями двух обмоток напряжения и добавочным сопротивлением Z . Общая реактивная мощность трехфазной нагрузки определяется как сумма показаний двух варметров умноженная на $\sqrt{3}$:

$$Q = \sqrt{3}(Q_1 + Q_2). \quad (8.32)$$

8.5.4 Измерение электрической энергии. Активную электрическую энергию в цепях переменного тока измеряют индукционными счетчиками, включенными по схемам, аналогичным схемам включения ваттметров. На рисунке 8.15 приведена схема включения однофазного индукционного счетчика активной энергии.

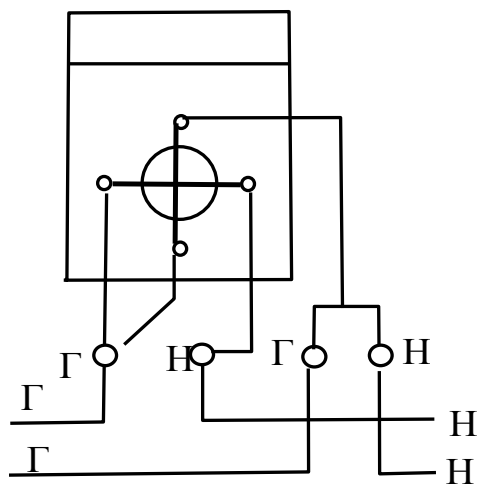


Рисунок 8.15 – Схема включения однофазного индукционного счетчика

Индукционные счетчики выпускаются однофазными и трехфазными. Расширение пределов измерения достигается включением счетчиков в цепь через измерительные трансформаторы.

Для учета активной энергии в трехфазных сетях широко применяются двухэлементные счетчики, представляющие собой совокупность двух однофазных индукционных счетчиков, вращающие моменты которых взаимодействуют на общей оси и счетный механизм. В основу положен метод, дающий возможность с помощью двух счетчиков (ваттметров) определять общую энергию (мощность), потребляемую в трехфазной системе.

На практике применяют также и трехфазные счетчики реактивной энергии. Учет реактивной энергии диктуется необходимостью определения среднего значения $\cos\phi$, положенного в основу поощрительного и штрафного тарифа, которые устанавливаются для потребителей электрической энергии. Штрафной тариф за превышение лимита потребления реактивной энергии способствует снижению крупными промышленными потребителями реактивной мощности своих установок, и, как следствие,

снижению потерь электроэнергии в высоковольтных распределительных сетях.

По точности счетчики делятся на классы 1,0; 2,0; 2,5 (счетчики активной энергии) и 2,0; 3,0 (счетчики реактивной энергии).

8.6 Измерение неэлектрических величин

В инженерной практике при контроле различных производственных процессов часто приходится иметь дело с измерением неэлектрических величин: механических (сила, давление, скорость и др.), тепловых (температура, теплоемкость и др.), световых (освещенность, световой поток и др.).

Для контроля неэлектрических величин и управления ими в настоящее время широко применяют электрические методы и электроизмерительные приборы. Они позволяют: получать данные с высокой степенью точности и в широком диапазоне изменения значений величин, определять характеристики объектов, находящихся на больших расстояниях и в труднодоступных местах, изучать быстро протекающие процессы, запоминать результаты измерения с помощью вычислительных машин или информационных систем и т. д.

Для того чтобы ту или иную неэлектрическую величину измерить, ее нужно предварительно преобразовать в электрический сигнал. Такое преобразование осуществляют с помощью датчиков или первичных преобразователей. На рис. 8.16 показана структурная схема устройства для измерения неэлектрической величины электрическим методом. На схеме показано: ПП – первичный преобразователь, ЭЦ – электрическая измерительная цепь, ВУ – выходное устройство. Измеряемая неэлектрическая величина x поступает на вход ПП, на выходе которого появляется электрический сигнал $y=f(x)$. Далее этот сигнал преобразуется в ЭЦ в другой электрический сигнал $U(x)$, который воспринимается ВУ, в результате чего на выходе всего устройства получается, например, отклонение указателя $\alpha(x)$. Шкала выходного устройства градуирована непосредственно в значениях неэлектрической величины x .

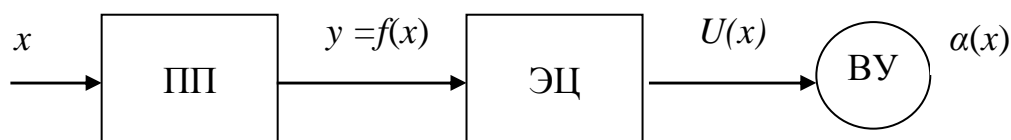


Рисунок 8.16 – Структурная схема устройства для измерения неэлектрической величины

Первичные преобразователи (ПП), используемые в измерениях, чрезвычайно разнообразны по устройству и принципу действия. Они делятся на генераторные и параметрические.

Генераторные ПП вырабатывают ЭДС или ток, и для их работы, как правило, не требуется дополнительный источник питания. К генераторным ПП относятся термоэлектрические преобразователи (термопары), индукционные, пьезоэлектрические, гальванические преобразователи и ряд других.

Параметрические ПП преобразуют изменение измеряемой неэлектрической величины в изменения того или иного параметра электрической цепи (R, L, M, C), и для их работы требуется дополнительный источник питания. К параметрическим ПП относятся: терморезисторы, тензорезисторы, реостатные, индуктивные и емкостные преобразователи и др. Одну и ту же неэлектрическую величину часто можно измерить с помощью различных ПП.

Электрические измерительные цепи (ЭЦ) в рассматриваемых устройствах состоят обычно из мостов или измерительных потенциометров. В простейшем случае ЭЦ может отсутствовать, и сигнал $Y = E(\theta)$ поступает непосредственно на выходной прибор.

Выходные устройства (ВУ), используемые при измерениях неэлектрических величин, весьма различны - от стрелочного магнитоэлектрического милливольтметра до самопишущего прибора с записью на диаграммной ленте или ЭВМ. При большом количестве одновременно контролируемых величин сигналы со всех ВУ поступают на диспетчерский пункт или в информационно-измерительную систему.

Выводы

1. Все измерения электрических и неэлектрических величин выполняются с некоторой погрешностью, определяемой методом измерений, чувствительностью и классом точности измерительного прибора.
2. Для оценки точности измерений используют понятия абсолютной, относительной и приведенной погрешности.
3. Различают систематические и случайные погрешности измерения. Систематические погрешности изменяются закономерно, при повторных измерениях остаются постоянными и обнаруживаются только при проверке прибора. Случайные погрешности обнаруживаются при повторных измерениях в виде разброса результатов.
4. Для оценки погрешности ЭИП установлены классы точности. Показывающие ЭИП имеют 8 классов точности. Цифра, характеризующая класс точности, определяет выраженную в процентах максимальную приведенную погрешность прибора.
5. Для повышения чувствительности применяют измерительные схемы (мостовая, компенсационная и др.).
6. Для повышения пределов измеряемых значений тока и напряжения применяют шунты, добавочные сопротивления, измерительные трансформаторы.

7. Для измерения неэлектрических величин используют различные датчики (первичные преобразователи), которые преобразуют измерение контролируемой физической величины в изменение электрического сигнала (напряжения или тока).

Вопросы для самопроверки

1. Поясните, в чем состоит разница между точностью и чувствительностью измерительного прибора?
2. Поясните, что понимают под погрешностью измерения и какие бывают погрешности измерений?
3. Поясните, что такое систематическая и что такое случайная погрешности измерения. Какими методами можно оценить их наличие и величину?
4. Поясните, что представляют собой абсолютная, относительная и приведенная погрешности. Для чего используют эти понятия?
5. Поясните, что представляет собой приведенная погрешность измерительного прибора.
6. Как и с какой целью различают погрешности измерений и погрешности средств измерений.
7. Чем обусловлена погрешность средства измерения?
8. Как и для чего расширяют пределы измерения измерителей тока и напряжения в цепях постоянного и переменного токов?
9. Как классифицируют методы измерений? Что представляют собой прямые методы измерений, и чем характеризуются косвенные методы?
10. Какие методы измерений Вам известны? Охарактеризуйте их.
11. Чем характеризуются и как отличаются методы непосредственной оценки и методы сравнения?
12. С какой целью для измерений используют измерительные схемы и измерительные преобразователи?
13. Как включают электродинамический ваттметр в цепь при измерении активной мощности в однофазной (трехфазной цепи)?
14. Как ваттметром измерить реактивную мощность трехфазной сети?
15. Чем обусловлена высокая точность измерения при компенсационном методе измерения?
16. Как подобрать амперметр или вольтметр для снижения методической погрешности измерения тока или напряжения?
17. Как с помощью двух ваттметров измерить в трехфазной трехпроводной цепи активную и реактивную мощности приемника?
18. С какими первичными преобразователями используются автоматические мосты и потенциометры?
19. В чем преимущества электрических методов измерения неэлектрических величин?

Раздел IV. ТРАНСФОРМАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Трансформаторы и электрические машины относятся к устройствам, в которых осуществляется преобразование энергии. В трансформаторах – электрической энергии одного класса напряжения или тока в другой класс напряжения или тока, в электрических машинах – механической энергии в электрическую или электрической в механическую.

Электрическая машина – это электромеханическое устройство, осуществляющее взаимное преобразование механической и электрической энергии. Устройства, преобразующие механическую энергию в электрическую, называют *генераторами*, а устройства, преобразующие электрическую энергию в механическую – *электродвигателями*. *Трансформатор* представляет собой устройство для преобразования электрической энергии переменного тока.

Возможность преобразования электрической энергии в механическую впервые была установлена М. Фарадеем, создавшим в 1821 году первую модель электрического двигателя, в которой электрический ток, протекая по медному проводу, вызывал его движение вокруг вертикально поставленного постоянного магнита. Однако дальнейшие работы по созданию электродвигателя в течение более чем десятилетнего периода не приносили удовлетворительных результатов. Лишь в 1834 году русским академиком Б. С. Якоби была создана конструкция, послужившая прототипом современного электродвигателя.

Возможность создания электрического генератора возникла только после открытия М. Фарадеем в 1831 году закона электромагнитной индукции. Используя это открытие, братья Пикси в 1832 году создали конструкцию первого электрического генератора с вращающимися постоянными магнитами и с коммутатором для выпрямления тока. Первое время развитие электродвигателей и генераторов шло независимо друг от друга. В 1833 году Ленцем был сформулирован принцип обратимости электрических машин, а в 1838 году этот принцип был практически осуществлен. Дальнейшим этапом развития генераторов явилась замена постоянных магнитов электромагнитами.

Начальный период развития электрических машин связан главным образом с постоянным током. Объясняется это тем, что потребителями электрической энергии являлись установки, работающие исключительно на постоянном токе (дуговые лампы, установки гальванопластики и т. п.). Применение электрического освещения в крупных городах потребовало повышения мощности электрических генераторов и их дальнейшего усовершенствования.

В 1867 году В. Сименс применил принцип самовозбуждения для генераторов последовательного возбуждения. В этом же году Д. Максвелл

впервые дал математическую теорию электрической машины с самовозбуждением, заложив основы теории электрических машин.

В 1870 году З. Грамм построил машину с кольцевым якорем, а в 1873 году Ф. Гефнер-Алтенек и В. Сименс сконструировали машину с «бараньим» якорем.

Развитие электрических железных дорог значительно увеличило спрос на электродвигатели и генераторы, что способствовало их дальнейшему совершенствованию.

В 80-х годах XIX века возникла необходимость передавать электроэнергию на расстояние. В 1882 году были проведены опыты по передаче электроэнергии на постоянном токе при повышенном напряжении. Однако высокое напряжение в генераторах постоянного тока ухудшило работу коллектора, что часто приводило к авариям. Все это усиливало интерес электротехников того времени к переменному току. Большая заслуга в развитии техники переменного тока принадлежит русскому ученому П. Н. Яблочкову, который широко использовал переменный ток для питания изобретенных им электрических свечей. В 1876 году П. Н. Яблочков применил для питания этих свечей трансформаторы с незамкнутым сердечником, положив тем самым начало практическому использованию трансформаторов. Трансформаторы с замкнутым сердечником, подобные современным трансформаторам, появились позднее, в 1884 году.

Началом практического применения переменного тока для целей электропривода следует считать 1889 год, когда русский инженер М. О. Доливо-Добровольский предложил для практического применения трехфазную систему переменного тока и построил трехфазный асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор.

Первая линия электропередачи трехфазного переменного тока протяженностью 175 км при напряжении 15 тысяч вольт с применением трехфазных трансформаторов была сооружена Доливо-Добровольским в 1891 году. Результаты испытаний этой линии подтвердили возможность применения системы трехфазного тока для передачи значительных количеств электроэнергии при сравнительно высоком КПД.

К началу XX века были созданы все основные виды электрических машин и разработаны основы их теории. Начиная с этого времени, быстрыми темпами происходит электрификация промышленности и транспорта.

В настоящее время трансформаторы и электрические машины применяются практически во всех отраслях экономики, в частности на предприятиях строительной индустрии и на строительных площадках.

Для понимания принципа действия электрических машин необходимо знание закона электромагнитной индукции (закон Фарадея) и закона электромагнитного взаимодействия (Био-Савара-Лапласа).

Закон электромагнитной индукции формулируется следующим образом: величина ЭДС e , наведенная в замкнутом проводнике, пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ , пронизывающего этот контур

$$e = \frac{-d\Phi}{dt}.$$

Знак минус отражает закон Ленца, в соответствии с которым индуцированный ток всегда стремится воспрепятствовать изменению магнитного потока контура (рамки).

В соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС в контуре наводится в следующих случаях:

- при вращении контура в неподвижном магнитном поле (принцип работы машины постоянного тока);
- при неподвижном контуре и вращающемся магнитном поле (принцип работы синхронных машин);
- при вращающихся и магнитном поле, и контуре (принцип работы асинхронных машин);
- при неподвижных в пространстве магнитном поле и контуре, но изменяющемся по величине во времени магнитном поле (принцип работы трансформаторов).

Принцип действия генератора состоит в том, что при перемещении со скоростью V м/с проводника, имеющего длину l м, перпендикулярно магнитным линиям в магнитном поле с индукцией B в нем по закону электромагнитной индукции возникает ЭДС

$$e = B \cdot l \cdot V, \text{ В.}$$

Если замкнуть концы проводника через сопротивление, или коротко, то под влиянием ЭДС по нему потечет ток I , А. Направления ЭДС и тока совпадают. Ток I , взаимодействуя с магнитным потоком, в котором находится проводник, создает силу, выталкивающую проводники из магнитного поля. Сила выталкивания проводника в соответствии с законом электромагнитного взаимодействия (закон Био-Саварра-Лапласа) равна

$$F = B \cdot I \cdot l, \text{ Н.}$$

Сила взаимодействия проявляется как реакция на внешнюю силу, приложенную к проводнику. Она равна и противоположна последней.

Принцип действия двигателя состоит в том, что при протекании тока по проводнику, находящемуся в магнитном поле, на проводник действует сила F , под воздействием которой он будет перемещаться.

9 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Ключевые понятия: трансформатор, первичная и вторичная обмотки, магнитопровод, режим холостого хода, режим короткого замыкания, повышающий и понижающий трансформатор, коэффициент трансформации, внешняя характеристика, автотрансформатор, измерительный трансформатор.

9.1 Общие сведения о трансформаторах

Трансформатор представляет собой электротехническое устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформатор состоит из стального сердечника и обмоток. Сердечник собран из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью снижения потерь мощности на гистерезис и вихревые токи.

Преобразование напряжения в трансформаторах осуществляется переменным магнитным потоком индуктивно связанных между собой обмоток. Обмотка, подключаемая к источнику электрической энергии, называется *первичной*, а обмотка, к которой подключена нагрузка – *вторичной*. Все параметры трансформатора, относящиеся к первичной обмотке (число витков, напряжение, ток и т. д.) называются первичными и в их буквенных обозначениях используется индекс 1. Соответственно параметры вторичной обмотки называются вторичными и записываются с индексом 2.

Если через трансформатор необходимо осуществить питание двух и более нагрузок с разными напряжениями питания, то выполняют несколько вторичных обмоток.

По назначению трансформаторы делятся на силовые и специального назначения (сварочные, измерительные, согласующие и др.).

Силовые трансформаторы бывают однофазными (для цепей однофазного тока) и трехфазными (для трехфазных цепей), повышающими и понижающими. На рисунке 9.1 показаны условные графические обозначения однофазного (*а, б, в*) и трехфазного (*г, д, е*) трансформаторов.

По способу охлаждения трансформаторы делятся на сухие и масляные. У масляных трансформаторов обмотки погружены в стальной бак, заполненный маслом.

На щитке трансформатора указывают его номинальные параметры: первичное и вторичное напряжение, номинальную полную мощность, ток при номинальной полной мощности, частоту, число фаз, схему соединения обмоток, режим работы (длительный или кратковременный), способ охлаждения.

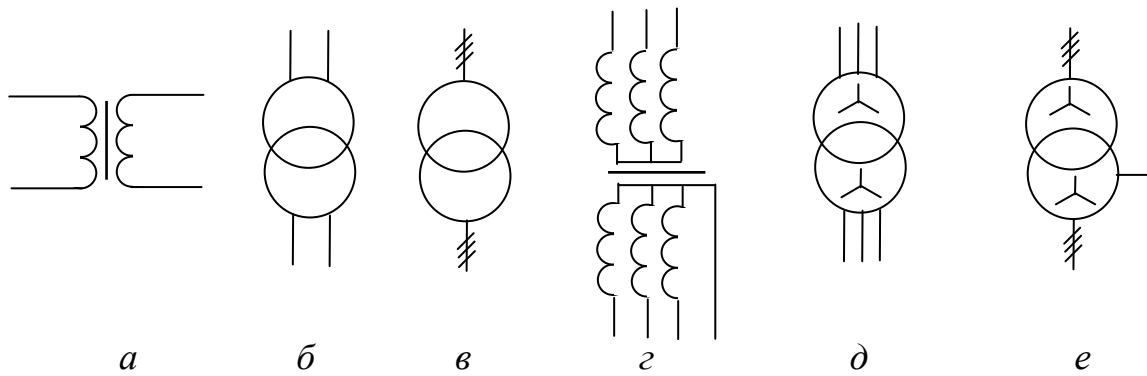


Рисунок 9.1 – Условные графические обозначения трансформаторов

9.2 Однофазный трансформатор

9.2.1 Принцип действия однофазного трансформатора. На сердечнике однофазного трансформатора (рис. 9.2) в простейшем случае расположены две обмотки, выполненные из изолированного провода. К первичной обмотке подводится питающее напряжение U_1 . Со вторичной обмотки снимается напряжение U_2 , которое подводится к потребителю электрической энергии Z_H .

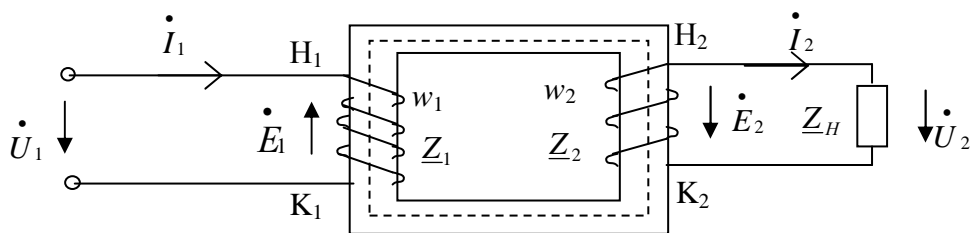


Рисунок 9.2 – Принцип действия однофазного трансформатора

Переменный ток i_1 , протекая по виткам первичной обмотки трансформатора w_1 , создает в сердечнике магнитопровода переменный магнитный поток Φ . Изменяясь во времени по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, этот поток пронизывает витки вторичной обмотки трансформатора. При этом в соответствии с законом электромагнитной индукции в ней наводится ЭДС e_2

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (9.1)$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки трансформатора;
 E_{m2} – амплитудное значение ЭДС во вторичной обмотке.

Под действием ЭДС e_2 во вторичной цепи трансформатора, замкнутой на нагрузку, протекает ток i_2 .

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению числа витков соответствующих обмоток называется **коэффициентом трансформации** трансформатора

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (9.2)$$

Если $E_1 < E_2$, то трансформатор является **повышающим**; при $E_1 > E_2$, он является **понижающим**.

9.2.2 Режимы работы трансформатора. В зависимости от величины сопротивления нагрузки различают три режима работы трансформатора: $Z_H = \infty$ - режим холостого хода; $0 < Z_H < \infty$ - режим нагрузки; $Z_H = 0$ - режим короткого замыкания.

В режиме холостого хода вторичная обмотка трансформатора разомкнута. Ток первичной обмотки трансформатора при отключенном потребителе электроэнергии является **током холостого хода** I_0

$$I_0 = I_{m0} \sin(\omega t + \alpha).$$

Входящий в уравнение угол магнитных потерь α (угол сдвига по фазе между током и магнитным потоком трансформатора) обусловлен потерями мощности в магнитопроводе трансформатора. Значение угла α для современных электротехнических сталей обычно невелико и составляет порядка 4-6°.

Напряжение, подводимое в режиме холостого хода к трансформатору, в соответствии со вторым законом Кирхгофа может быть представлено как сумма падений напряжения в первичной цепи

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_0 + jX_1 \dot{I}_0, \quad (9.3)$$

где R_1 – активное сопротивление первичной обмотки;

X_1 - индуктивное сопротивление первичной обмотки;

E_1 – ЭДС, наводимая в первичной обмотке магнитным потоком

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Исходя из уравнения электрического равновесия (9.3), можно построить векторную диаграмму трансформатора для режима холостого хода (рис. 9.3).

Вследствие перемагничивания магнитопровода, в нем возникают потери мощности, которые называют **потерями холостого хода**. Мощность P_0 , потребляемая из сети в режиме холостого хода, расходуется в основном на покрытие потерь в магнитопроводе, так как потери в обмотке $R_1 I_0^2$ малы. Ток холостого хода I_{10} содержит активную и реактивную составляющие $I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}.$

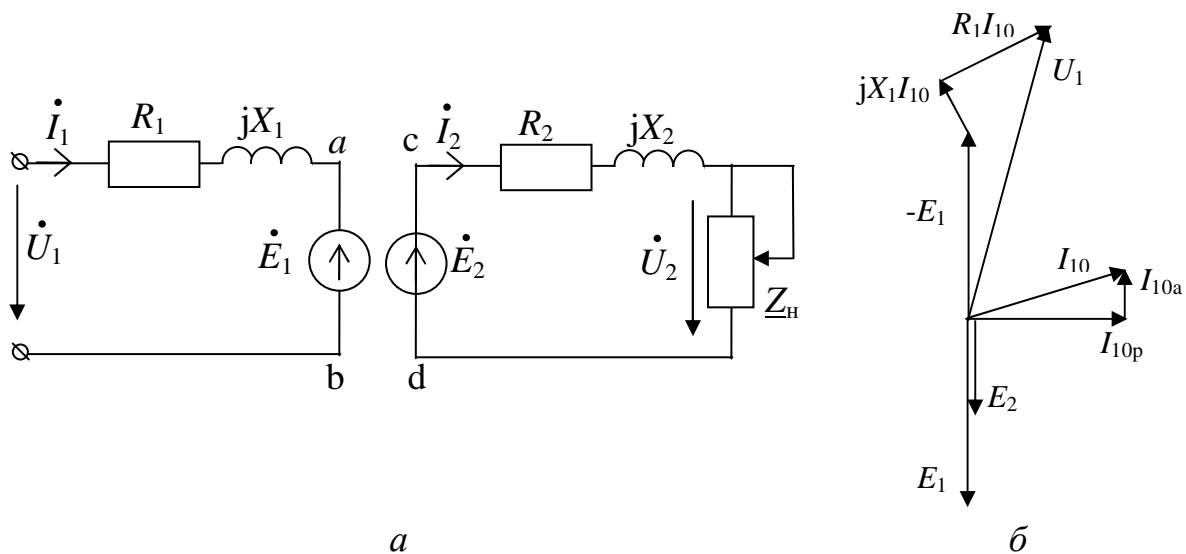


Рисунок 9.3 – Схема замещения и векторная диаграмма режима холостого хода

Режим короткого замыкания для силового трансформатора является аварийным. Однако некоторые специальные трансформаторы рассчитываются для работы в режиме, близком к короткому замыканию. Это сварочные трансформаторы и измерительные трансформаторы тока.

При работе трансформатора в режиме нагрузки ($Z_H \neq 0$) во вторичной цепи под воздействием \dot{E}_2 появляется ток \dot{I}_2 . Основным магнитный поток Φ_0 создается совместным действием магнитодвижущей силы первичной и вторичной обмоток. Результирующая магнитодвижущая сила F_p равна их геометрической сумме (рис. 9.3, б)

$$\dot{F}_p = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = w_1 \dot{I}_{10}. \quad (9.4)$$

С учетом активного сопротивления обмоток уравнения электрического состояния первичной и вторичной цепей имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1) \dot{I}_1, \\ \dot{E}_2 &= (R_2 + jX_2) \dot{I}_2 + \underline{Z}_H \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (9.5)$$

9.2.3 Схемы замещения трансформатора. Для исследования режимов работы трансформаторов целесообразно магнитную связь между первичной и вторичной обмотками заменить электрической связью. Соединение перемычками ac и bd на схеме, приведенной на рисунке 9.3, а, возможно, если $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{cd}$. Этому требованию удовлетворяет условие $\dot{E}_2' = -\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{w_1}{w_2}$, где \dot{E}_2' называется приведенной ЭДС.

Эквивалентность энергетических соотношений в трансформаторе и его схема замещения не будут нарушены, если полная мощность $S_2 = S_2'$ ($E_2 I_2 = E_2' I_2'$), активная мощность $P_2 = P_2'$ ($R_2 I_2^2 = R_2' I_2'^2$) и реактивная мощность $Q_2 = Q_2'$ ($X_2 I_2^2 = X_2' I_2'^2$), а также мощность в нагрузке $S_H = S_H'$ ($U_2 I_2 = U_2' I_2'$) останутся неизменными. Из последних равенств можно получить значения параметров схемы замещения, которые называются приведенными (к числу витков w_1).

$$I_2' = I_2 \frac{1}{n}; \quad R_2' = R_2 n^2; \quad X_2' = X_2 n^2; \quad U_2' = U_2 n; \quad Z_2' = Z_2 n^2. \quad (9.6)$$

Таким образом, схема трансформатора (рис. 9.3, а) может быть представлена в виде эквивалентной схемы замещения, показанной на рисунке 9.4, а. Полная система уравнений электрического и магнитного состояния трансформатора с учетом приведения вторичной обмотки к первичной по числу витков и $\dot{U} = -\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ имеет вид

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U} + \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \\ \dot{U} = \underline{Z}_2' \dot{I}_2' + \dot{U}_2'; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'. \end{cases} \quad (9.7)$$

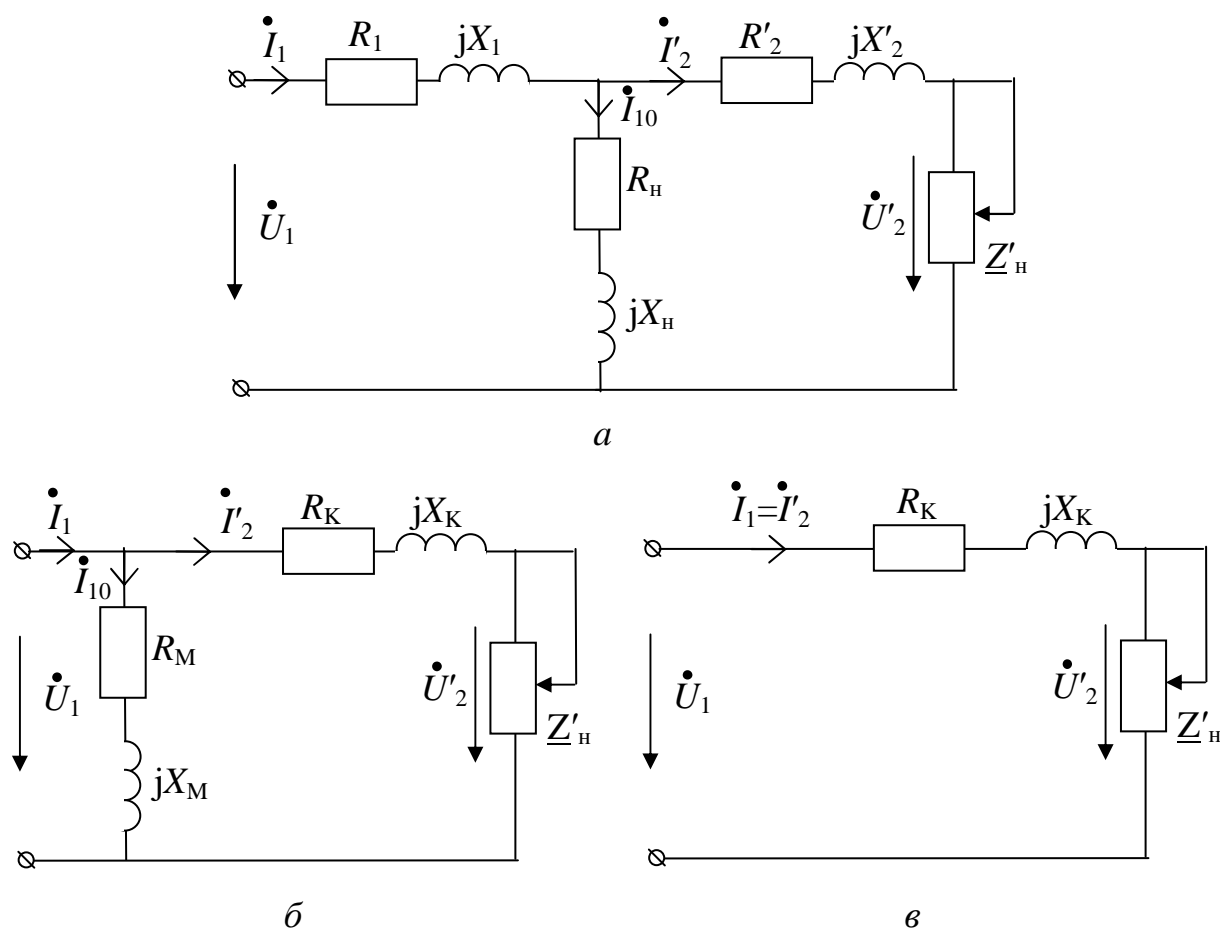


Рисунок 9.4 – Схемы замещения однофазного трансформатора:
а – Т-образная; б – Г-образная, в – режима к.з.

Эти уравнения описывают электромагнитные процессы в двухконтурной схеме, которая носит название эквивалентной схемы замещения трансформатора. На рисунке 9.4, *а* представлена Т-образная схема замещения трансформатора. В тех случаях, когда $\underline{Z}_1 \dot{I}_1$ невелико по сравнению с \dot{U}_1 , полагают $U_1 \approx U$, схема замещения упрощается (рис. 9.4, *б*). Такая схема называется Г-образной. Здесь $X_k = X_1 + X_2'$; $R_k = R_1 + R_2'$.

В режимах работы трансформатора, близких к короткому замыканию, когда $I_{10} \ll I_1$, из схемы рисунка 9.4, *б* исключается ветвь $R_M - X_M$ (см. рис. 9.4, *в*).

Эквивалентные схемы замещения трансформатора используются для анализа и расчетов режимов его работы, поэтому их называют расчетными схемами замещения трансформатора.

9.3 Паспортные параметры и внешняя характеристика трансформатора

9.3.1 Основные параметры. В процессе преобразования напряжения в трансформаторе возникают потери электрической энергии в обмотках и магнитопроводе, вызванные нагревом. Чем больше ток нагрузки и напряжение источника, тем сильнее нагреваются обмотки и магнитопровод трансформатора. Длительный перегрев обмоток может вызвать старение и разрушение изоляции, следствием которого является межвитковое короткое замыкание и выход трансформатора из строя. Поэтому для обеспечения продолжительной работы силового трансформатора под нагрузкой заводом-изготовителем задаются параметры, называемые **паспортными данными**: полная мощность S_n , коэффициент трансформации n , напряжения U_{1n} и U_{2n} , напряжение короткого замыкания $U_{кз}$, токи I_{1n} , I_{2n} и ток холостого хода I_{10n} , частота f_n , режим работы (продолжительный или кратковременный), потери в стали магнитопровода ΔP_{0n} и в обмотках ΔP_{mn} и др. В процессе длительной эксплуатации, особенно при токовых перегрузках, колебаниях первичного напряжения и частоты, повышенной влажности и температуры окружающей среды, свойства изоляции ухудшаются, повышаются потери энергии. Поэтому необходимо периодически проверять основные параметры трансформатора, к которым относятся $U_{кн}$ и I_{10n} , характеризующие потери энергии в обмотках, изоляции и стали магнитопровода.

Для этой цели проводятся два опыта: опыт холостого хода и опыт короткого замыкания. На основании этих опытов определяют также параметры схем замещения.

9.3.2 Опыт холостого хода. Схема включения измерительных приборов при опыте холостого хода представлена на рисунке 9.5, *а*. В процессе опыта измеряют: U_1 , U_2 , I_{10} , P_0 при изменении U_1 от 0 до U_{1n} . При $U_1 = U_{1n}$

определяют: потери в стали магнитопровода ΔP_{0H} , коэффициент трансформации $n = U_1/U_2$, ток холостого хода I_{10H} . Полученные данные позволяют рассчитать параметры схемы замещения:

$$R_M = \frac{\Delta P_{0H}}{I_{10H}^2}; \quad Z_M = \frac{U_{1H}}{I_{10H}}; \quad X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2}; \quad \cos \varphi_{0H} = \frac{\Delta P_{0H}}{I_{10H} U_{1H}}. \quad (9.8)$$

При расчете предполагается, что потери в обмотке невелики, так как I_{10H} составляет 5–10% от I_{1H} .

9.3.3 Опыт короткого замыкания. При проведении опыта короткого замыкания (рис. 9.5, б) вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, а первичная обмотка включается через регулятор напряжения РН на такое пониженное напряжение U_{1K} , при котором в обмотках трансформатора протекают номинальные токи. Это напряжение называют **напряжением короткого замыкания**. В опыте измеряются I_1 , I_2 , $U_1 = U_K$ и P_2 при изменении тока I_1 от 0 до I_{1H} . При $I_1 = I_{1H}$ определяют потери короткого замыкания ΔP_{KH} , напряжение короткого замыкания U_{KH} .

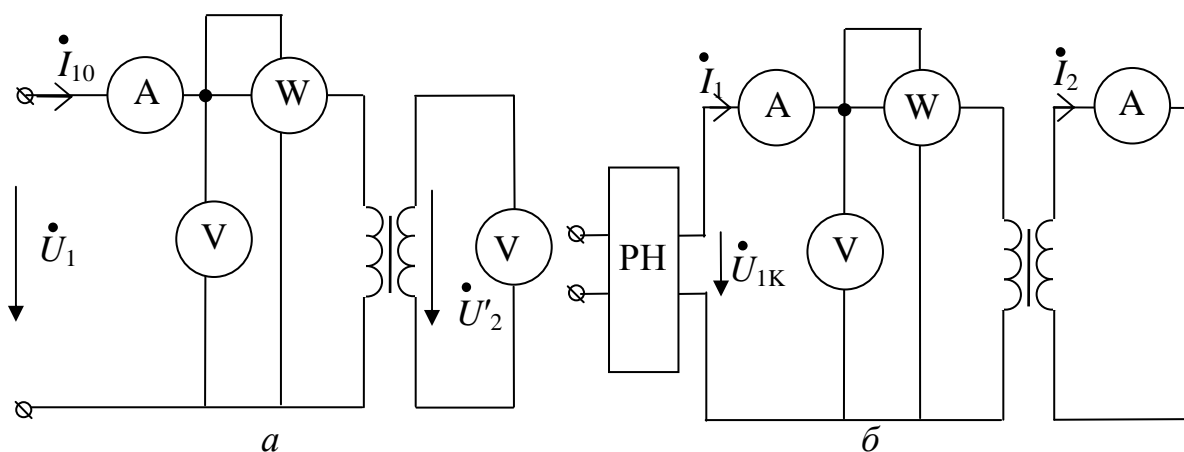


Рисунок 9.5 – Схемы опытов холостого хода (а) и короткого замыкания (б)

По данным опыта короткого замыкания рассчитывают параметры схемы замещения:

$$R_K = \frac{\Delta P_{KH}}{I_{1H}^2}; \quad Z_K = \frac{U_{KH}}{I_{1H}}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \quad \cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K}, \quad (9.9)$$

где $R_K = R_1 + R_2'$ и $X_K = X_1 + X_2'$ — активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания трансформатора.

При расчете предполагают, что при малом напряжении магнитный поток и намагничивающий ток малы, т. е. $I_{10} \approx 0$. Поэтому можно считать, что магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмоток трансформатора

равны

$$w_1 I_1 = w_2 I_2 \text{ или } I_1 = I_2' \quad (9.10)$$

и, следовательно, ваттметр измеряет потери мощности только в обмотках.

Напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие выражаются обычно в процентах:

$$U_{K\%} = \frac{U_{KH}}{U_{1H}} 100\% . \quad (9.11)$$

По значению U_K можно рассчитать ток короткого замыкания I_K при аварийном режиме:

$$I_{1K} = \frac{U_{1H}}{Z_K} = I_{1H} \frac{U_{1H}}{U_{KH}} = I_{1H} \frac{100}{U_{K\%}} . \quad (9.12)$$

9.3.4 Внешняя характеристика трансформатора. Рабочие свойства трансформатора характеризуются зависимостью напряжения на нагрузке U_2 и КПД η от тока I_2 .

Зависимость $U_2(I_2)$ при различном характере нагрузки (активной, реактивной, емкостной) называется *внешней характеристикой трансформатора*.

Внешняя характеристика трансформатора $U_2(I_2)$ и зависимость $\eta(I_2)$ могут быть получены опытным путем или рассчитаны по эквивалентной схеме замещения. В последнем случае уравнение электрического состояния, полученное из Г-образной схемы замещения (см. рис. 9.4, б), имеет вид

$$\dot{U}_2' = \dot{U}_1 - (R_K + jX_K) \dot{I}_2' . \quad (9.13)$$

Вид зависимости $U_2(I_2)$ определяется характером нагрузки. Так, при емкостном характере нагрузки ($\cos\varphi < 0$) с ростом тока I_2 напряжение U_2 возрастает, а при индуктивном характере ($\cos\varphi > 0$) - падает (рис. 9.6).

Коэффициент полезного действия трансформатора η равен отношению полезной активной мощности P_2 ко всей активной мощности, поступающей из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_C + \Delta P_M} , \quad (9.14)$$

где ΔP_C – потери мощности в стали магнитопровода;

ΔP_M – потери мощности в меди обмоток.

Полезная мощность трансформатора при любом характере нагрузки

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_H \cos \varphi_2 , \quad (9.15)$$

где S_H – полная мощность трансформатора, ВА;

$\beta = I_2/I_{2H}$ – коэффициент нагрузки.

Потери в стали ΔP_C не зависят от нагрузки и равны потерям холостого хода. Потери в обмотках ΔP_M пропорциональны квадрату тока

$$\Delta P_M = R_K I_2^2 = R_K I_H^2 \beta^2 = \Delta P_{MH} \beta^2,$$

где R_K – активное сопротивление обмотки.

После подстановки выражение для КПД будет иметь вид

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2 + \Delta P_C + \Delta P_{MH} \beta^2}. \quad (9.16)$$

Зависимости, ΔP_C и η от коэффициента нагрузки β представлены на рисунке 9.7. Зависимость $\eta(\beta)$ имеет максимум. Посредством подбора параметров обмоток и магнитопровода для силовых трансформаторов выбирают η_{\max} при $\beta = 0,6-0,7$.

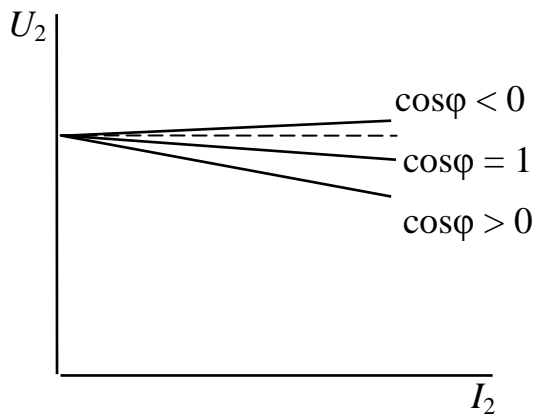


Рисунок 9.6 – Зависимость $U_2(I_2)$ при различном характере нагрузки

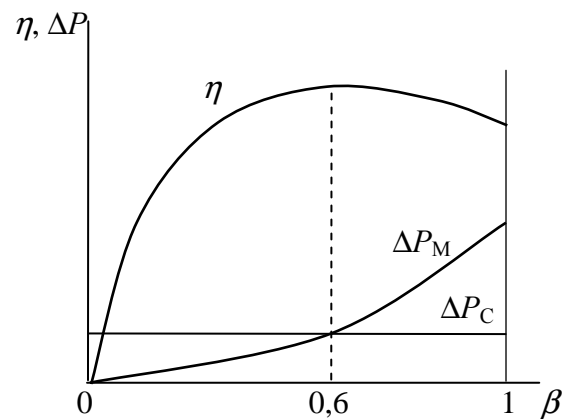


Рисунок 9.7 – Зависимости ΔP_C и η от коэффициента нагрузки β

9.4 Трехфазные трансформаторы

Для трехфазных трансформаторов эквивалентные схемы замещения изображаются для одной фазы и имеют такой же вид, как и для однофазного трансформатора. Параметры схемы замещения определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Конструктивно трехфазные трансформаторы выполняют стержневыми (рис. 9.8). На каждом из трех стержней размещают первичную и вторичную обмотки одной фазы. Результирующие магнитодвижущие силы каждой фазы смещены относительно друг друга на 120° , сумма векторов магнитных потоков равна нулю ($\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$). Фазы первичной и вторичной обмоток могут соединяться в звезду (Y) и треугольник (Δ). Поэтому векторы линейных напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 могут не совпадать по фазе.

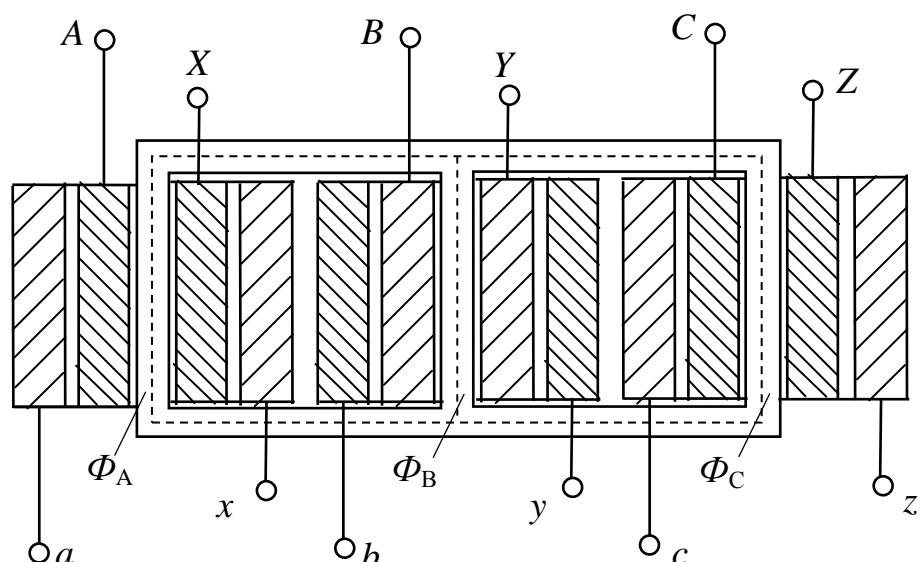


Рисунок 9.8 - Устройство трехфазного трансформатора

Сдвиг по фазе указывается группой соединения обмоток. Так, например, на схеме (см. рис. 9.9, *а*) показана группа соединения $Y/Y - 0$, где 0 указывает на совпадение фазы A вторичной обмотки с фазой A первичной. На рисунке 9.9, *б* показана схема соединения $Y/\Delta - 11$, здесь 11 указывает, что вектор напряжения \dot{U}_{AB} первичной обмотки опережает по фазе \dot{U}_{ab} вторичной обмотки на 30° и совпадает с положением часовой стрелки на цифре 11.

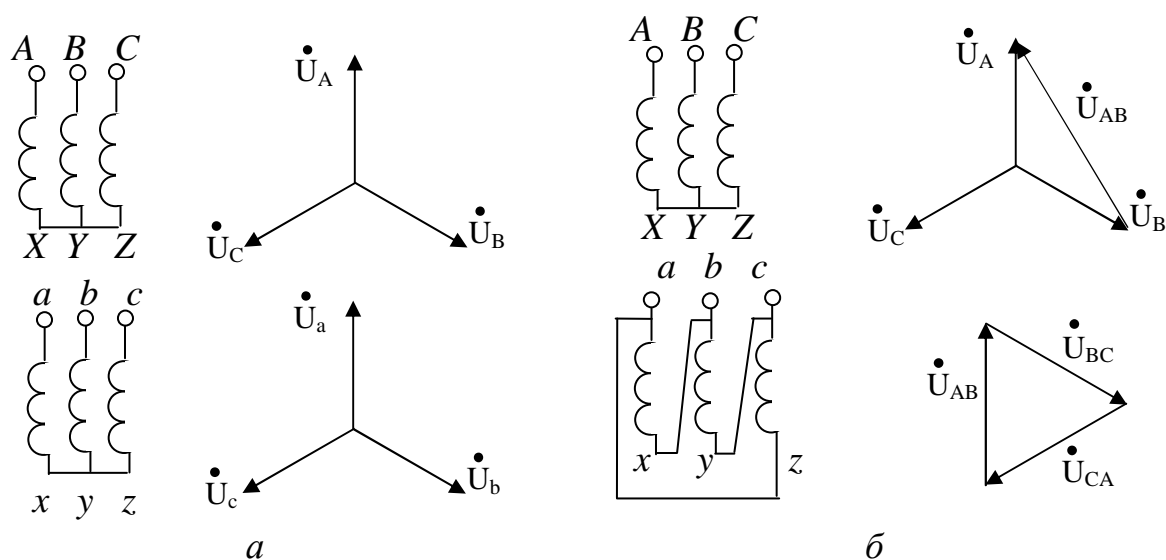


Рисунок 9.9 – Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

9.5 Автотрансформаторы

Преобразование переменного напряжения может быть осуществлено с использованием автотрансформатора. Автотрансформатор в конструктивном отношении подобен обычному трансформатору: имеет замкнутый

стальной магнитопровод, на котором размещены две обмотки, выполненные из медного провода различного сечения. В отличие от трансформатора обмотки автотрансформатора электрически соединены.

У понижающего автотрансформатора обмотка вторичного напряжения является частью обмотки первичного напряжения. У повышающего, наоборот, обмотка первичного напряжения является частью обмотки вторичного напряжения. Таким образом, в автотрансформаторе, кроме магнитной связи между первичной и вторичной обмотками, имеется и электрическая связь.

Электрические схемы понижающего и повышающего автотрансформаторов представлены на рисунке 9.10. Напряжение источника, приложенное к зажимам первичной обмотки AX с числом витков w_1 , уравнивается в основном ЭДС E_1 , создаваемой переменным магнитным потоком в магнитопроводе. Вторичная обмотка имеет число витков w_2 . В ней создается ЭДС $E_2 = E_1(w_1/w_2)$.

Коэффициент трансформации равен отношению первичного и вторичного напряжений:

$$n = U_1/U_2 = w_1/w_2. \quad (9.17)$$

При подключении к зажимам ax нагрузки Z_H ток в общей части обмотки ax I_{12} будет равен геометрической сумме токов первичной и вторичной цепей $\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

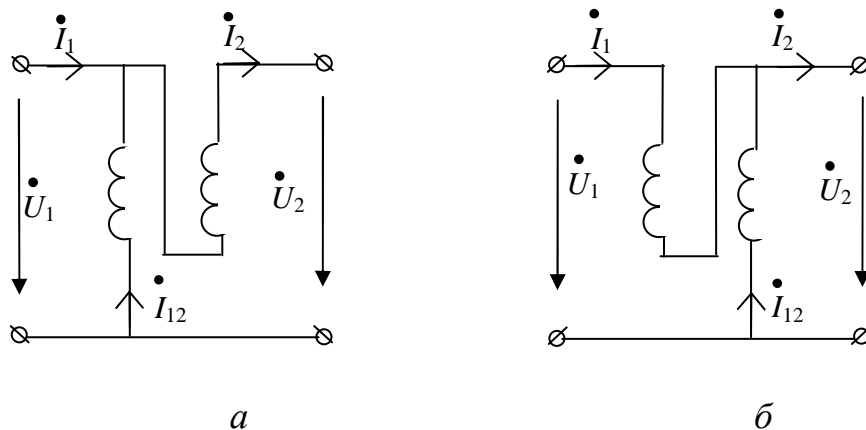


Рисунок 9.10 – Схемы автотрансформаторов:
а – повышающего, б – понижающего

Мощность, потребляемая автотрансформатором из сети, без учета потерь будет равна мощности, выделяемой в нагрузке, т. е. $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$, откуда следует

$$I_1/I_2 = U_1/U_2 = n.$$

При этом так же, как и в обычном трансформаторе, основной магнитный поток Φ_{0m} остается неизменным при неизменном напряжении \dot{U}_1 .

Если пренебречь током холостого хода, то можно считать, что токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° , и их геометрическая сумма равна алгебраической, т. е.

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 [(1 - (1/n))]. \quad (9.18)$$

Электромагнитные процессы в автотрансформаторе ничем не отличаются от процессов в обычном трансформаторе. Преимуществом автотрансформатора перед трансформатором является более простое устройство, меньший расход меди, более высокий КПД, меньшие потери в обмотках и стали магнитопровода. Это объясняется тем, что в автотрансформаторе энергия из первичной сети во вторичную частично передается по электрической связи.

Однако автотрансформатор по сравнению с трансформатором имеет весьма существенные недостатки. Он имеет малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большой ток короткого замыкания, а электрическая связь между обмотками при высоком первичном напряжении опасна при прикосновении человека к проводам в цепи нагрузки.

Электромагнитные процессы в трехфазном автотрансформаторе такие же, как и в однофазном. Трехфазные автотрансформаторы применяются в электроэнергетике для связи сетей смешанных напряжений, например 110 и 220 кВ, 220 и 500 кВ и т. п., при пуске асинхронных трехфазных электродвигателей с целью уменьшения пусковых токов.

Автотрансформаторы низкого напряжения выполняют на небольшую мощность (до 7,5 кВА). Они имеют, как правило, обмотку с одним сечением провода и могут использоваться как для повышения, так и понижения напряжения.

В лабораториях широко применяются автотрансформаторы низкого напряжения малой мощности (ЛАТРы), имеющие плавную регулировку выходного напряжения. У этих автотрансформаторов один зажим нагрузки выполнен в виде подвижного (скользящего) контакта.

9.6 Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяют для измерения напряжений и токов. Измерительные трансформаторы напряжения используются для включения вольтметров, частотомеров, обмотки напряжения ваттметров и счетчиков. Измерительные трансформаторы тока предназначены для подключения амперметров, реле, токовых обмоток ваттметров и счетчиков.

На рисунке 9.11 показана схема включения измерительных приборов через измерительные трансформаторы в однофазную сеть.

Для безопасности прикосновения к приборам один зажим вторичных обмоток трансформаторов заземляют. Измеряемое напряжение U_1 по показанию вольтметра будет $U_1 = n_U \cdot U_2$, а измеряемый ток I_1 - по показаниям

амперметра: $I_1 = n_I I_2$, где n_U и n_I - коэффициенты трансформации трансформаторов напряжения и тока соответственно.

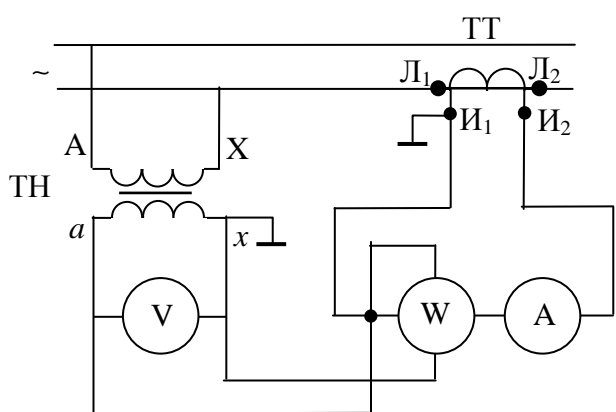


Рисунок 9.11 – Схемы включения трансформатора напряжения и тока

Вторичные обмотки имеют стандартные значения U_2 и I_2 : 100 В для трансформаторов напряжения и 5 и 1 А для трансформаторов тока. Поэтому диапазон измерения может быть расширен путем регулирования коэффициентов трансформации, т. е. соотношения числа витков.

Измерительный трансформатор напряжения работает в режиме, близком к холостому ходу. Очевидно, точность измерения напряжения будет тем выше, чем меньше

падение напряжения на трансформаторе. Действительно, из схемы замещения (см. рис. 9.4) следует, что погрешность

$$\delta_U = \frac{U_2 w_2 / w_1 - U_1}{U_1} 100$$

тем меньше, чем меньше R_K и X_K , что достигается снижением числа витков при увеличении сечения стали магнитопровода.

В трансформаторах тока, наоборот, снижение погрешности достигается путем снижения тока I_{10} , для чего используется ленточный магнитопровод кольцевой формы из материала с малыми потерями (малое значение коэрцитивной силы H_C) и работе в ненасыщенной части кривой намагничивания.

Поскольку нормальным режимом работы трансформатора тока является режим короткого замыкания, то для переключений во вторичной цепи устанавливают приспособления, замыкающие выходные зажимы вторичной обмотки.

Выводы

1. Переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения той же частоты трансформаторами.
2. Существует три режима работы трансформатора: режим холостого хода, режим нагрузки и режим короткого замыкания.
3. Анализируют и рассчитывают режимы трансформатора с помощью эквивалентных схем замещения.
4. Трехфазные трансформаторы на эквивалентной схеме замещения изображаются так же, как и однофазные.

5. Автотрансформатор в конструктивном отношении подобен обычному трансформатору, но его обмотки электрически соединены.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните назначение и принцип действия трансформатора.
2. По каким признакам классифицируют трансформаторы?
3. Поясните значения символов на условные графических обозначениях трансформаторов.
4. Почему магнитопровод трансформатора выполняется из электротехнической, а не из обычной стали, и собирается из отдельных тонких, изолированных друг от друга листов?
5. Как располагают обмотки трансформатора на сердечнике магнитопровода?
6. Что называется коэффициентом трансформации трансформатора и как его определить?
7. Поясните принцип действия и назначение повышающего и понижающего трансформаторов.
8. С какой целью используется электрическая схема замещения трансформатора?
9. Поясните принцип построения схем замещения трансформатора.
10. С какой целью проводят опыт холостого хода трансформатора? Какие измерения при этом производят и какие параметры рассчитывают?
11. С какой целью проводят опыт короткого замыкания трансформатора? Какие измерения при этом производят и какие параметры рассчитывают?
12. Поясните физику потерь мощности холостого хода трансформатора.
13. Какие параметры трансформатора называют паспортными?
14. Как получают внешнюю характеристику трансформатора и что она характеризует?
15. От чего зависит вид внешней характеристики трансформатора?
16. Сравните векторные диаграммы Т-образной и Г-образной схем замещения трансформатора и составьте по ним уравнения электрического состояния.
17. Как соединяют обмотки трехфазных трансформаторов?
18. Как определяется коэффициент полезного действия трансформатора? От чего он зависит?
19. Каковы достоинства и недостатки автотрансформаторов по сравнению с обычными трансформаторами?

10 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые понятия: геометрическая нейтраль, физическая магнитная нейтраль, реакция якоря, процесс коммутации, круговой огонь на коллекторе, дополнительные полюса, компенсационная обмотка, номинальные параметры, внешняя характеристика, характеристика холостого хода, скоростная характеристика, механическая характеристика.

Необходимость использования машин постоянного тока (МПТ) в качестве генераторов или двигателей в таких отраслях как электрохимия, в электротяговых и подъемных устройствах, в электроприводе с широким диапазоном регулирования скорости обусловлена рядом их особенностей. В строительной индустрии машины постоянного тока используются в электросварочных установках, в электроприводе башенных кранов и др.

10.1 Устройство машины постоянного тока

Конструктивно генератор электрической энергии и электрический двигатель постоянного тока выполняются одинаково и состоят из двух основных частей: неподвижного электромагнита - индуктора, создающего основное магнитное поле машины, и вращающегося якоря, в обмотке которого механическая энергия преобразуется в электрическую (генератор), или электрическая - в механическую (двигатель).

Неподвижный индуктор состоит (рис. 10.1, *а*) из стальной литой станины 1, главных 2 и дополнительных 3 полюсов. На главных полюсах размещаются обмотки возбуждения, к которым подводится постоянный ток, создающий в магнитной цепи машины основное магнитное поле (полюс - воздушный зазор - якорь - воздушный зазор - полюс - станина - полюс).

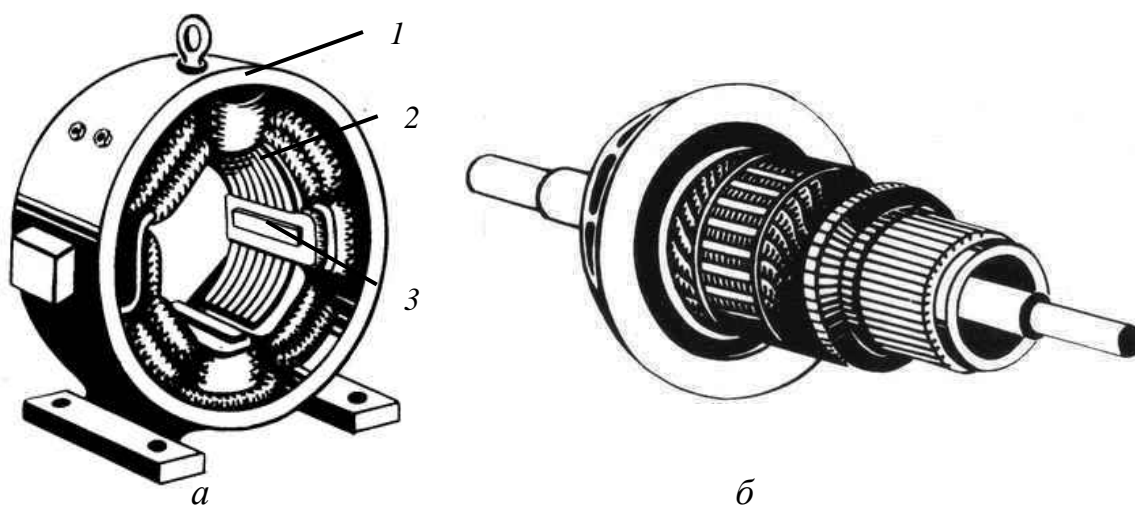


Рисунок 10.1 – Индуктор (*а*) и якорь (*б*) машины постоянного тока

Главные полюса набирают из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм для уменьшения потерь от вихревых токов, возникающих из-за пульсаций магнитного поля при вращении якоря.

Дополнительные полюса выполняют обычно из кованой стали, а их обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря. Дополнительное магнитное поле, создаваемое ими, служит для улучшения коммутации.

Вращающаяся часть машины постоянного тока - якорь с обмотками и коллектором (см. рис. 10.1, б). Сердечник якоря набирается из лакированных пластин электротехнической стали (0,5 мм) для уменьшения потерь на вихревые токи, которые возникают при вращении якоря в магнитном поле. На внешней поверхности якоря имеются пазы, в которые укладывается замкнутая обмотка.

Обмотка якоря выполняется из медного изолированного провода в виде секций. Секции обмотки укладываются в пазы в два слоя (двухслойная обмотка), изолируются и закрепляются в них деревянными клиньями, а части обмотки, выходящие по торцам якоря из пазов, крепят стальными проволочными бандажами, чтобы предотвратить вырывание обмотки из пазов при вращении якоря. Секции обмотки соединяются между собой и с коллекторными пластинами и образуют замкнутую обмотку с определенным числом параллельных ветвей. Количество ветвей определяется типом обмотки.

Различают параллельные (петлевые) и последовательные (волновые) обмотки. Петлевые (рис. 10.2, а) имеют число параллельных ветвей, равное числу пар полюсов машины, а волновые (рис. 10.2, б) образуют одну пару параллельных ветвей.

Простота и надежность последовательной обмотки обуславливают их наибольшее распространение в машинах общего применения.

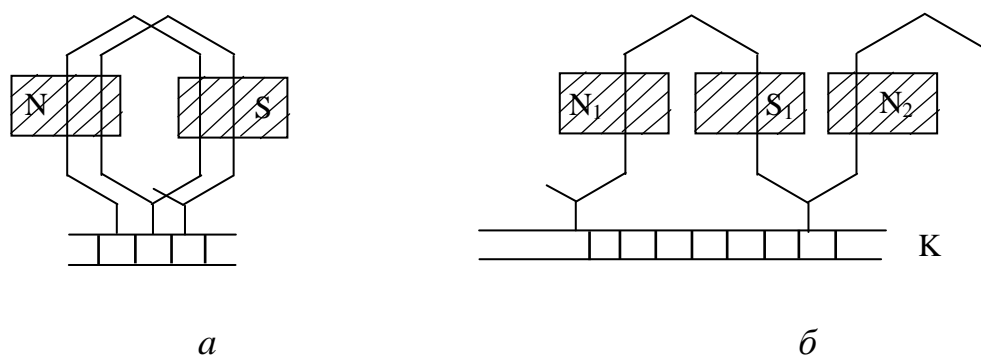


Рисунок 10.2 – Виды обмоток МПТ

Коллектор (рис. 10.3), к которому присоединяется обмотка якоря, состоит из отдельных медных пластин 1, изолированных друг от друга и от вала прокладками из миканита 2 (изоляционный материал на основе слюды).

Коллектор предназначен для выпрямления переменного тока якоря для внешней цепи у генераторов; у двигателей - для изменения направления тока в проводниках обмотки якоря при его вращении. С одной стороны к пластинам коллектора припаиваются секции обмотки якоря. По коллектору скользят неподвижные щетки, закрепляемые в специальных щеткодержателях.

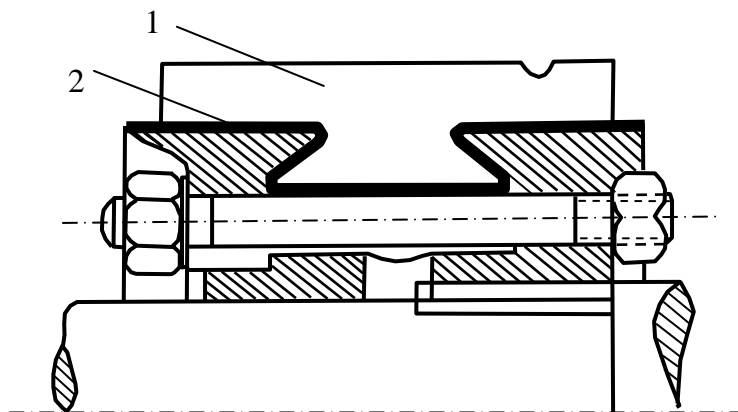


Рисунок 10.3 – Устройство коллектора МПТ

Устройство МПТ в собранном виде показано на рис. 10.4. К станине 6 болтами крепят главные полюса, состоящие из сердечника 4 и катушки обмотки возбуждения 5. С торцовых сторон к станине крепят боковые щиты 7 с подшипниками, удерживающими вал машины. Якорь машины состоит из сердечника 3, обмотки 9 и коллектора 1. На валу якоря укреплен вентилятор 8, на коллекторе помещены неподвижные щетки 2.

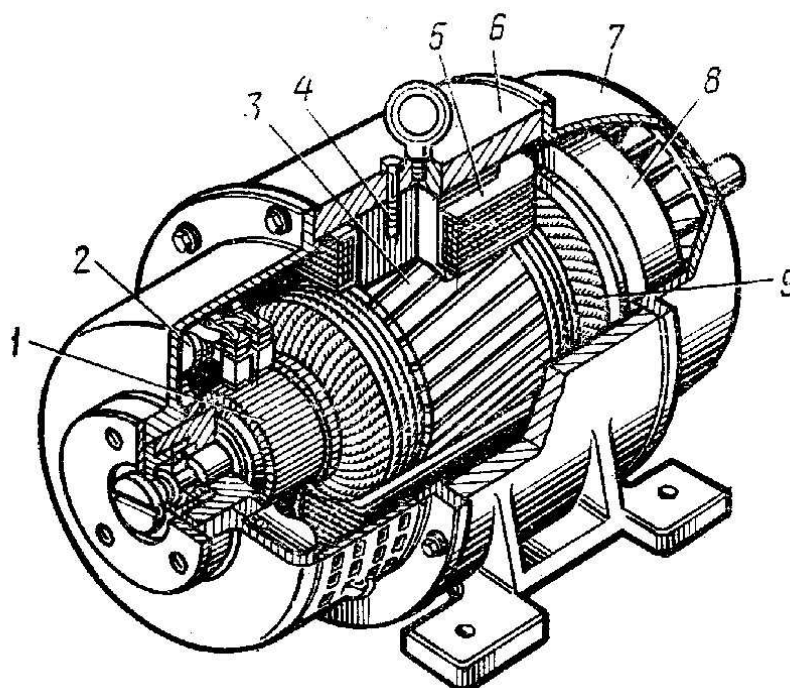


Рисунок 10.4 – Устройство машины постоянного тока

10.2 Принцип действия генератора постоянного тока

В генераторе постоянного тока происходит преобразование механической энергии, подводимой от первичного двигателя, в электрическую, снимаемую с обмотки якоря с помощью коллектора и щеток. К щеткам генератора присоединяются потребители электрической энергии.

В основе принципа действия генератора лежит явление электромагнитной индукции, согласно которому при перемещении проводника в магнитном поле в нем наводится электродвижущая сила. Величина и направление этой ЭДС определяется законом электромагнитной индукции и принципом Ленца.

Рассмотрим принципиальную схему генератора постоянного тока (рис. 10.5, а). В магнитном поле, создаваемом полюсами N и S , вращается один виток обмотки якоря. Концы витка соединены с простейшим коллектором в виде двух изолированных друг от друга полуколец, к которым прилегают щетки a и b , соединенные с нагрузкой.

Если виток вращается с постоянной скоростью, и магнитное поле равномерно, то в нем будет наводиться ЭДС и протекать переменный синусоидальный ток. Так как нагрузка присоединена через щетки к двум полукольцам, то, несмотря на то, что при перемене сторон витка местами, ток в них изменяет свое направление, во внешней цепи он будет протекать в одном направлении. Таким образом, полукольца (коллекторные пластины) осуществляют преобразование переменного тока обмотки якоря в пульсирующий постоянный ток во внешней цепи генератора (рис. 10.5, б).

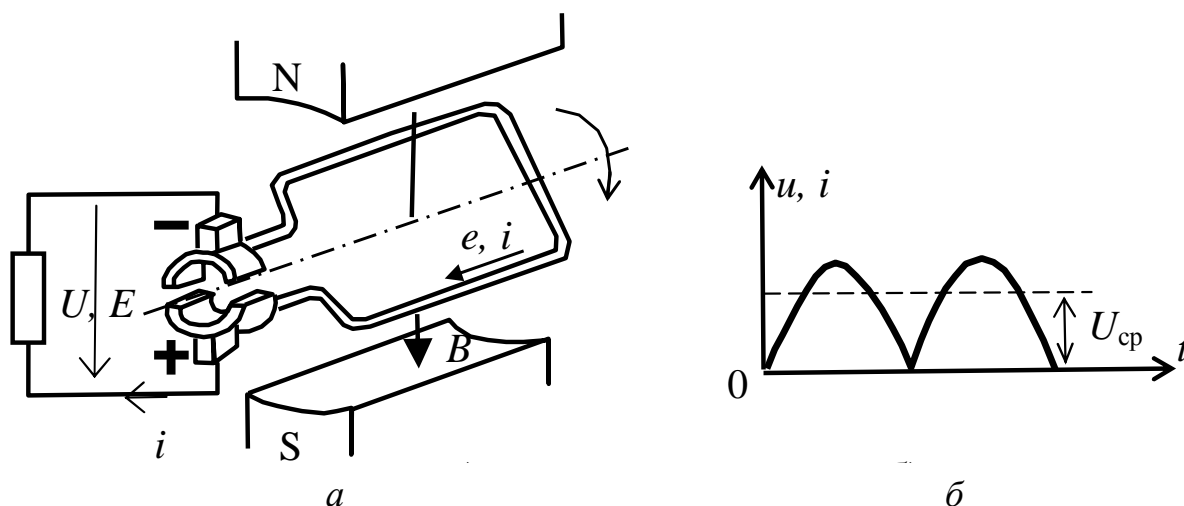


Рисунок 10.5 – Принцип работы генератора постоянного тока

Для уменьшения пульсаций и получения больших ЭДС обмотка якоря состоит из множества витков, присоединяемых к соответствующему числу коллекторных пластин.

ЭДС обмотки якоря машины постоянного тока определяется конструкцией машины, скоростью вращения якоря и величиной магнитного потока, создаваемого системой возбуждения

$$E = \frac{N}{\alpha} \frac{pn}{60} \Phi = c_n \Phi, \text{ В}, \quad (10.1)$$

где $c = \frac{N}{\alpha} \frac{pn}{60}$ – конструктивная постоянная машины, зависящая от типа обмотки якоря и числа пар полюсов;

N – общее число проводников якоря;

α – число пар параллельных ветвей обмотки якоря;

p – число пар полюсов;

n – скорость вращения, об/мин;

Φ – магнитный поток пары полюсов машины, Вб.

Таким образом, ЭДС якоря прямо пропорциональна скорости вращения машины и магнитному потоку. Обычно скорость вращения якоря также является постоянной величиной, поэтому регулирование величины ЭДС, а следовательно, и напряжения генератора получают изменением магнитного потока путем регулирования тока в обмотках возбуждения полюсов.

Если внешняя цепь генератора разомкнута (режим холостого хода), то напряжение на зажимах машины равно ЭДС $U_0 = E$. Если генератор нагружен, то по обмотке якоря протекает ток, и напряжение на зажимах машины становится меньше ЭДС на величину падения напряжения на сопротивлении в цепи якоря

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (10.2)$$

где $R_{\text{я}}$ – суммарное сопротивление цепи якоря.

10.3 Реакция якоря

Если генератор (двигатель) работает без нагрузки, то магнитное поле образуется только током, протекающим в обмотке возбуждения. Этот основной магнитный поток полюсов Φ_0 (рис. 10.6, а) направлен перпендикулярно геометрической нейтрали ($x - x$). В этом случае физическая магнитная нейтраль (линия $\varphi - \varphi$, проходящая через точки окружности якоря, где индукция равна нулю) совпадает с геометрической нейтралью.

При работе генератора на нагрузку по обмотке якоря протекает ток, и создается дополнительное магнитное поле якоря $\Phi_{\text{я}}$, неподвижное в пространстве. Ось магнитного поля якоря $\Phi_{\text{я}}$ совпадает с осью щеток (рис. 10.6, б). Напряженность этого поля зависит от тока нагрузки генератора. Магнитное поле якоря накладывается на основное магнитное поле полюсов, искажает и частично ослабляет его. Это воздействие поля якоря на основной поток полюсов называется реакцией якоря (рис. 10.6, в).

Вследствие насыщения стали полюсов усиление поля меньше, чем ослабление, поэтому результирующий поток полюсов уменьшается.

Искажение магнитного поля приводит к тому, что происходит смещение физической магнитной нейтрали на некоторый угол α (у генераторов - в направлении вращения, у двигателей - против направления вращения). Этот угол зависит от нагрузки генератора (двигателя), т. е. от тока якоря.

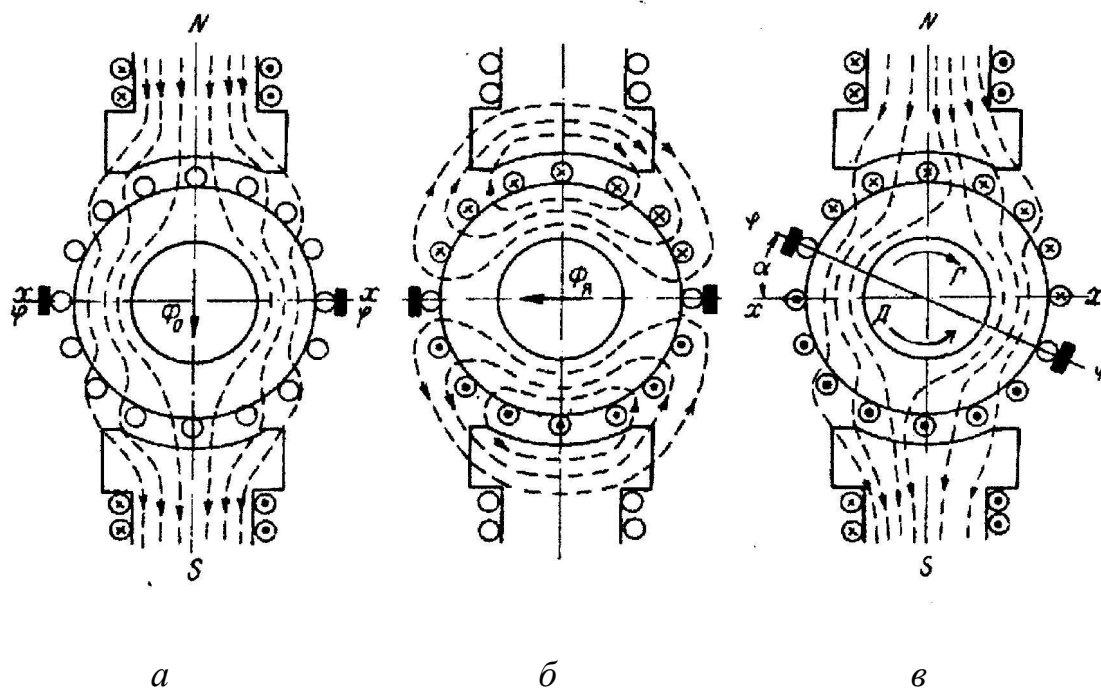


Рисунок 10.6 – Реакция якоря

При работе машины в режиме генератора под влиянием реакции якоря на сбегающем крае полюса результирующее поле усиливается и ослабляется на набегающем. При работе в режиме двигателя при том же направлении вращения происходит усиление результирующего поля под набегающим краем, полюса и ослабление под сбегающим. Вследствие этого в генераторе уменьшается ЭДС и напряжение на его зажимах, а в двигателе уменьшается электромагнитный момент и изменяется частота вращения. Кроме этого, реакция якоря вызывает искрение под щетками, что приводит к обгоранию коллекторных пластин.

Эффективной мерой уменьшения влияния поля якорной обмотки на поле основных полюсов является применение **компенсационной обмотки**, активные проводники которой укладывают в пазы, выштампованные на поверхности полюсных наконечников. Компенсационная обмотка включается последовательно с якорной обмоткой таким образом, чтобы создаваемые этими обмотками магнитные потоки были направлены встречно и взаимно компенсировались.

10.4 Коммутация в машинах постоянного тока

Процесс переключения секций из одной параллельной ветви в другую путем замыкания этих секций щетками и совокупность явлений, связанных с изменением тока в переключаемых секциях, называют коммутацией.

Для пояснения процесса коммутации обратимся к рисунку 10.7, *а*, где изображен якорь с одной из секций в различные моменты времени 1, 2 и 3. По указанным направлениям тока в проводниках якоря можно заключить, что к моменту времени 3 рассматриваемая секция перешла из одной параллельной ветви в другую, и ток в секции изменил свое направление на обратное. За время между моментами времени 1 и 3, когда рассматриваемая секция вместе с двумя коллекторными пластинами и щеткой образуют короткозамкнутый контур (рис. 10.7, *б*), ток в ней изменяется от $+i_a$ до $-i_a$. При изменении тока в коммутируемой секции наводится ЭДС самоиндукции $e_L = -L \frac{di_a}{dt}$. В реальной машине щетка обычно перекрывает две-три коллекторные пластины, и изменение направления тока происходит одновременно в нескольких близлежащих секциях. Поэтому в каждой из одновременно коммутируемых секций индуцируются ЭДС взаимной индукции e_M . Сумму ЭДС самоиндукции и взаимной индукции называют реактивной ЭДС e_p .

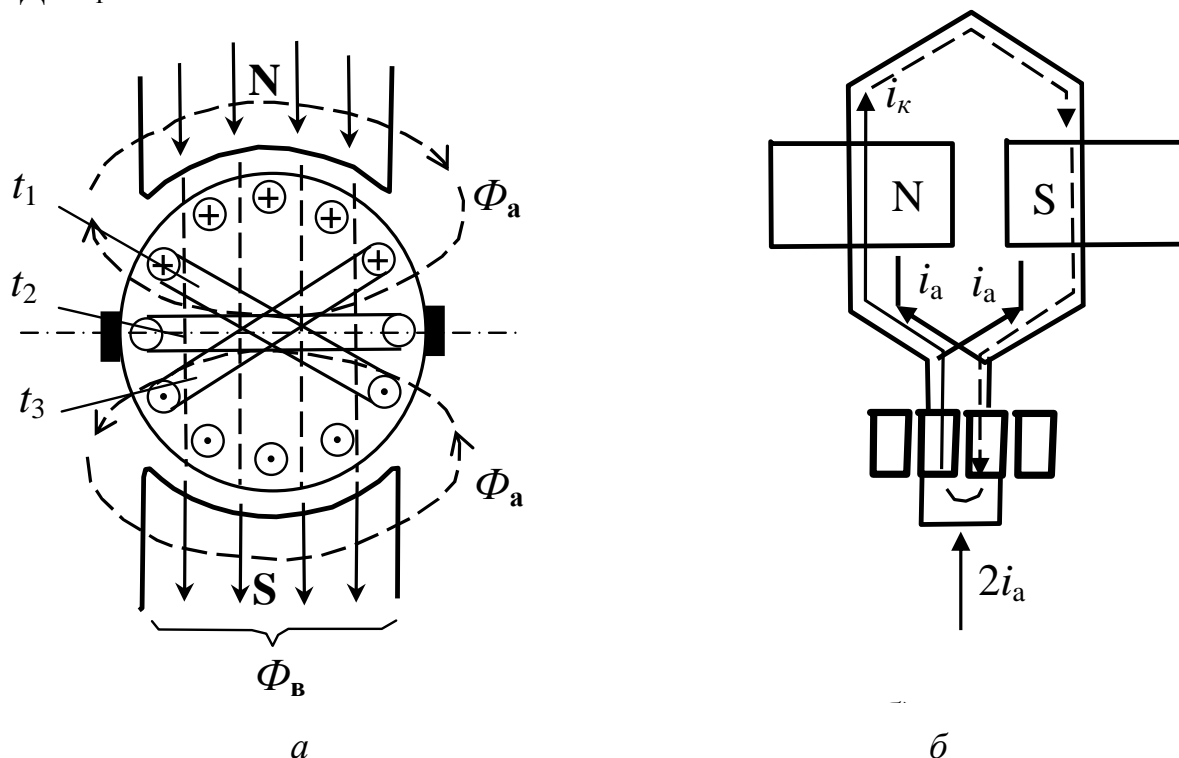


Рисунок 10.7 – Коммутация секций обмотки якоря: *а* – процесс переключения секций; *б* – взаимное расположение щетки и коллектора в процессе коммутации

Кроме реактивной ЭДС e_p , в коммутируемой секции за счет пересечения ею результирующего магнитного поля (поля обмотки якоря и поля основных полюсов) индуцируется также ЭДС вращения $e_{вр}$.

Результирующая ЭДС коммутируемой секции $e_K = e_L + e_M + e_{BP}$ может вызвать в короткозамкнутом контуре значительный ток коммутации

$$i_K = \frac{e_K}{R_K} = \frac{e_L + e_M + e_{BP}}{R_K}, \quad (10.2)$$

где R_K – сопротивление всего коммутирующего контура.

Так как каждая секция обладает индуктивностью, то прерывание тока при переходе секции из одной параллельной ветви в другую вызывает повышение напряжения в месте размыкания и образование искрения между щеткой и коллекторной пластиной. Искрение будет тем сильнее, чем больше ток коммутации i_K .

Из (10.2) следует, что уменьшить ток i_K и тем самым улучшить коммутацию машины можно:

- а) увеличив сопротивление цепи коммутируемой секции;
- б) уменьшив реактивную ЭДС e_p ;
- в) создав в цепи коммутируемой секции ЭДС, компенсирующую e_p .

Первый из указанных способов улучшения коммутации сводится к выбору щеток с большим сопротивлением.

Наиболее эффективным методом борьбы с искрением является установка в машинах добавочных полюсов, создающих в зоне коммутации магнитное поле, направленное навстречу полю якоря. При этом в коммутируемой секции индуцируется ЭДС вращения, которая компенсирует реактивную ЭДС и уменьшает ЭДС коммутируемой секции, улучшая тем самым коммутацию машины. Число добавочных полюсов обычно равно числу основных (только машины мощностью от 300 Вт до 3,5 кВт могут иметь два основных и один добавочный полюс).

Добавочные полюса устанавливают на геометрических нейтральных, их обмотку соединяют последовательно с якорной обмоткой.

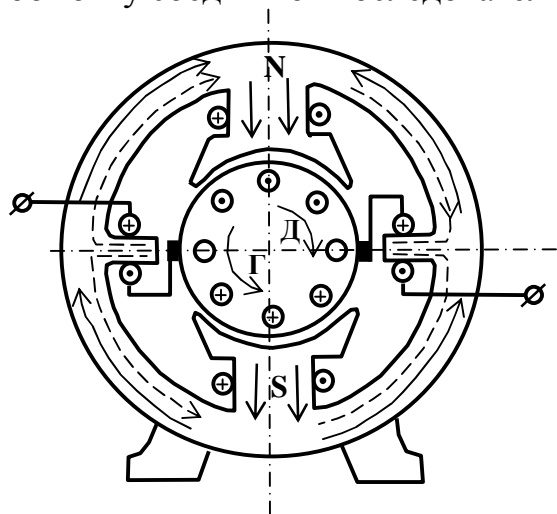


Рисунок 10.8 – Схема включения обмоток дополнительных полюсов

Картина магнитных потоков и полярность добавочных полюсов при работе машины в режиме генератора Г и двигателя Д с учетом направления вращения изображена на рисунке 10.8. Магнитная цепь добавочных полюсов должна быть ненасыщенной, так как только при этом индукция в зазоре под добавочным полюсом будет изменяться пропорционально току якоря, а величина намагничивающей силы добавочных полюсов – в зависимости от нагрузки.

В нереверсивных машинах малой мощности с уменьшенным числом добавочных полюсов улучшение коммутации (уменьшение e_K) может быть достигнуто смещением щеток с геометрической нейтрали при работе машины в режиме генератора в направлении вращения якоря, в режиме двигателя – против вращения якоря.

10.5 Потери энергии и КПД

Процессы преобразования механической энергии в электрическую и наоборот, происходящие в машине постоянного тока, сопровождаются потерями энергии. Эти потери подразделяют на электрические, магнитные, механические и добавочные.

К электрическим потерям относят потери в обмотках якоря и обмотках возбуждения, а также потери в щеточном контакте.

Потери в обмотке якоря и в последовательной обмотке возбуждения пропорциональны квадрату тока и равны $I^2 \cdot R$, где R - сопротивление якорной цепи машины. Электрические потери в щеточных контактах определяют исходя из тока якорной цепи и падения напряжения под щетками одной полярности

$$\Delta P_{щ} = 2\Delta U_{щ} I_{я}. \quad (10.3)$$

Электрические потери в сопротивлениях якорной цепи, включая и щеточный контакт, составляют примерно 50% всех потерь в машине.

Потери энергии в обмотке возбуждения машин с независимым, параллельным и смешанным возбуждением принято определять через мощность, поглощаемую этой обмоткой $\Delta P_B = U_B \cdot I_B$. Они составляют 0,5–7% от номинальной мощности машины, причем меньший процент потерь относится к более мощным машинам.

Суммарные электрические потери в машине постоянного тока

$$\Delta P_{\Sigma} = I_{я}^2 R_{я} + I_{я}^2 R_{о.в.} + I_{я}^2 R_{д.п.} + \Delta P_{щ} + \Delta P_B, \quad (10.4)$$

где $R_{о.в.}$, $R_{д.п.}$ – сопротивления последовательной обмотки возбуждения и обмотки добавочных полюсов.

В машинах постоянного тока магнитный поток неподвижен в пространстве и постоянен во времени. Поэтому вращательному перемагничиванию подвергается только сталь якоря, из-за чего его сердечник выполняют набранным из листового материала. Магнитные потери в стали якоря ΔP_c составляют менее 1–3% от номинальной мощности машины. К магнитным относят также потери в полюсных наконечниках, основных полю-

сах и в ярме, обусловленные пульсациями магнитного потока, причиной которых является зубчатая конструкция якоря.

Механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$, к которым относят потери от трения в подшипниках, вентиляционные потери и на трение щеток о коллектор, зависят от частоты вращения якоря, и для машин мощностью 10–500 кВт составляют 0,5–2% от $P_{\text{ном}}$ (меньший процент относится к более мощным машинам).

В машинах постоянного тока имеются и другие потери, объединенные в группу добавочных потерь $\Delta P_{\text{доб}}$. Обычно их полагают равными $0,01 P_{\text{ном}}$.

Зная сумму всех потерь в машине

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}, \quad (10.5)$$

можно определить ее КПД (в процентах):

$$\text{для генераторов} \quad \eta = \left(1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_2 + \Delta P_{\Sigma}} \right) 100, \quad (10.6)$$

$$\text{для двигателей} \quad \eta = \left(1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1} \right) 100, \quad (10.7)$$

где P_1 – мощность, подводимая к двигателю;

P_2 – полезная мощность, отдаваемая генератором.

Машины мощностью до 100 кВт имеют КПД 75–90%, мощностью 500–1000 кВт – 91–95%.

10.6 Схемы включения обмоток возбуждения

В зависимости от схемы включения различают МПТ с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

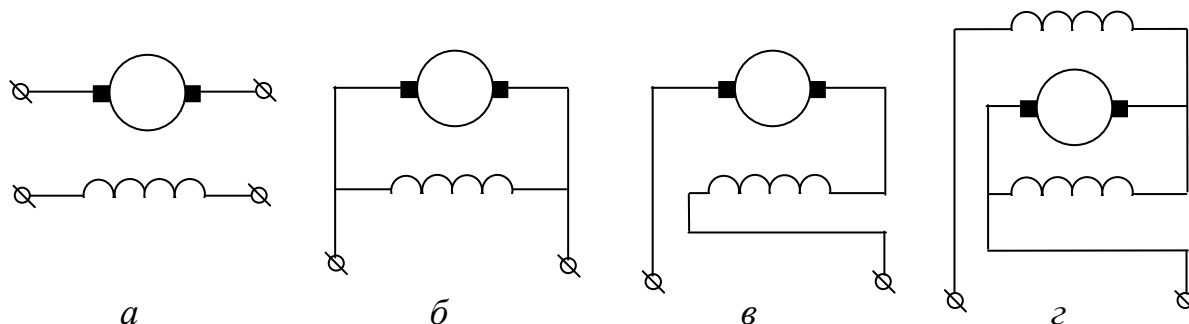


Рисунок 10.9 – Схемы включения обмоток возбуждения машин:

а – с независимым возбуждением; *б* – с параллельным возбуждением;
в – с последовательным возбуждением; *г* – со смешанным возбуждением

В машинах с независимым возбуждением (рис. 10.9, *а*) обмотка возбуждения питается от постороннего источника электрического тока, непосредственно не связанного с якорными цепями машины.

В МПТ с параллельным возбуждением обмотка возбуждения соединена параллельно с цепью якоря (рис. 10.9, б). При необходимости обмотку возбуждения этой машины можно включить и по схеме с независимым возбуждением.

В машинах с последовательным возбуждением обмотка возбуждения соединена последовательно с цепью якоря (рис. 10.9, в). Ее выполняют проводами большого сечения с малым количеством витков и малым сопротивлением.

На основных полюсах машин со смешанным возбуждением (рис. 10.9, г) имеется по две катушки, одна из которых соединена с цепью якоря последовательно, а вторая – параллельно.

В МПТ небольшой мощности (десятки–сотни ватт) магнитное поле возбуждения создается постоянными магнитами.

Многообразие схем включения обмоток возбуждения определяет различие характеристик и свойств генераторов и двигателей постоянного тока.

10.7 Номинальные параметры и характеристики машины постоянного тока

Номинальными параметрами электрических машин называются такие параметры, которые характеризуют номинальный режим работы машины, т. е. режим работы при условиях, для которого она предназначена.

Под номинальной мощностью МПТ понимают: в режиме генератора – электрическую мощность, отдаваемую во внешнюю цепь, в режиме двигателя – полезную механическую мощность на валу.

По значениям номинальных параметров можно выбрать ту или иную МПТ, определить рациональность ее использования в конкретной электро-технической установке, обеспечить правильную техническую эксплуатацию с целью ее надежной работы в пределах установленного срока.

Свойства и особенности электрических машин принято анализировать с помощью графиков – характеристик, которые приводятся в сборниках технических данных или каталогах, либо снимаются экспериментально (отдельные характеристики можно рассчитать).

Наибольший практический интерес для генераторов представляет зависимость напряжения на его зажимах U от тока нагрузки $I_{\text{я}}$ при постоянных скорости вращения ω и токе обмотки возбуждения $I_{\text{в}}$. Эту зависимость называют внешней характеристикой $U = f(I_{\text{я}})$. Часто используется характеристика холостого хода, представляющая собой зависимость напряжения U от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при постоянной скорости вращения и разомкнутой внешней цепи ($I_{\text{я}} = 0$). Так как при этом напряжение на генераторе равно его ЭДС E , то характеристика холостого хода является зависимостью $E = f(I_{\text{в}})$ при $\omega_{\text{ном}} = \text{const}$ и $I_{\text{я}} = 0$.

Для двигателей постоянного тока наибольший интерес представляет зависимость скорости вращения ω от тока $I_{\text{я}}$ или от вращающего момента M при постоянном напряжении питания. Зависимость $\omega = f(I_{\text{я}})$ называют скоростной характеристикой, а зависимость $\omega = f(M)$ – механической характеристикой.

10.8 Генераторы постоянного тока

10.8.1 Генератор с независимым возбуждением. Электрическая схема генератора показана на рисунке 10.10. Обмотка возбуждения питается от вспомогательного источника постоянного тока. Мощность возбудителя обычно составляет 3–4% мощности генератора. Ток в обмотке возбуждения определяется напряжением источника и сопротивлениями цепи возбуждения

$$I_B = \frac{U_B}{R_{0.B} + R_p} \quad (10.8)$$

и не зависит от нагрузки генератора. Изменяя сопротивление регулировочного реостата R_p , можно плавно изменять ток возбуждения, а следовательно, магнитный поток машины, изменяя таким образом ЭДС и напряжение генератора, так как

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}} = cn\Phi - I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

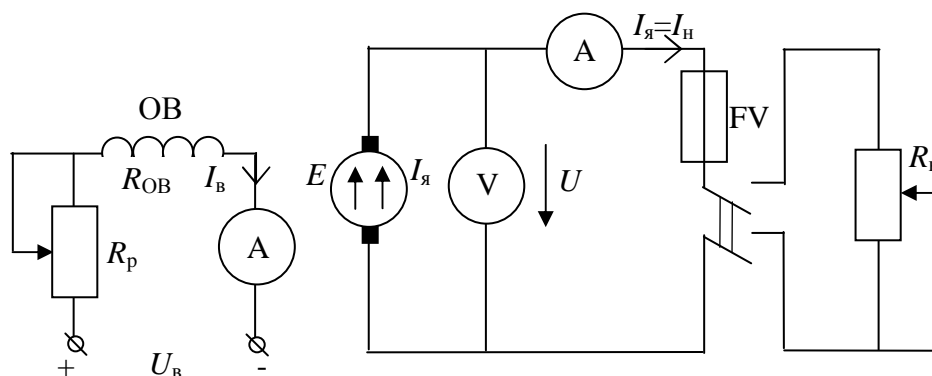


Рисунок 10.10 – Схема генератора с независимым возбуждением

В режиме холостого хода генератора $I_{\text{я}} = 0$ и $U_0 = E = cn\Phi = f(I_B)$. Эта зависимость ЭДС от тока возбуждения называется *характеристикой холостого хода*. Она показана на рисунке 10.11, а.

Характеристика холостого хода начинается со значений напряжения $E_{\text{ост}}$, обусловленного при $I_B = 0$ потоком остаточного магнетизма полюсов. Вид этой характеристики определяется кривой намагничивания магнитной цепи машины.

Характерной особенностью генераторов с независимым возбуждением является возможность плавного регулирования ЭДС, а следовательно, и напряжения на зажимах машины в широких пределах от 0 до U_n .

В нагрузочном режиме напряжение на зажимах якоря снижается в основном из-за падения напряжения в сопротивлениях цепи якоря, так как $U = E - I_a \cdot R_a$. Влияние реакции якоря в пределах номинальной нагрузки генератора невелико. Поэтому снижение напряжения на зажимах машины при увеличении тока якоря от 0 до $I_{a,ном}$ незначительно и составляет

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} = 5 \div 10\%. \quad (10.9)$$

Зависимость $U = f(I_a)$ называется **внешней характеристикой генератора** и имеет вид, показанный на рисунке 10.11, б. Напряжение генератора можно поддерживать постоянным, незначительно изменяя ток возбуждения регулировочным реостатом R_p .

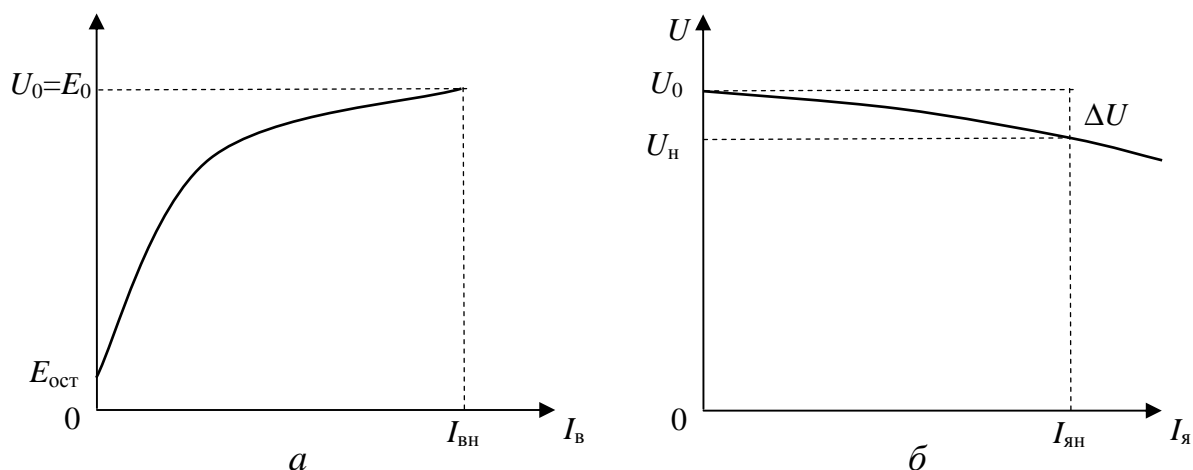


Рисунок 10.11 – Характеристики генератора с независимым возбуждением: а – характеристика холостого хода; б – внешняя характеристика.

Недостаток генератора постоянного тока с независимым возбуждением заключается в необходимости иметь вспомогательный источник питания для цепи возбуждения. При перегрузке генератора сверх номинальной мощности напряжение на зажимах машины уменьшается более резко из-за возрастающего размагничивающего действия реакции якоря. Ток якоря возрастает и при коротком замыкании достигает большой величины $I_{кз} = (15-20)/I_{ном}$. Поэтому, чтобы предотвратить повреждение генератора, должна быть установлена защита, которая отключает его при коротком замыкании (например, плавкий предохранитель FU на рисунке 10.10).

10.8.2 Генератор с параллельным возбуждением. Электрическая схема генератора приведена на рисунке 10.12. Обмотка возбуждения включается параллельно зажимам якоря, рассчитывается на небольшой ток $I_b = (0,01-0,03) \cdot I_n$ и имеет большое число витков провода небольшого сече-

ния. Ток в обмотке возбуждения определяется напряжением на зажимах якоря и сопротивлением цепи возбуждения

$$I_{\epsilon} = \frac{U}{R_{\epsilon}} = \frac{E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{R_{\text{о.с}} + R_{\text{р}}} \quad (10.10)$$

Характеристика холостого хода $E = f(I_{\text{в}})$ (рис. 10.13, а) имеет вид, аналогичный характеристике генератора с независимым возбуждением. Генератор устойчиво самовозбуждается в том случае, если $E > I_{\text{в}} \cdot R_{\text{в}}$, т. е. если характеристика холостого хода $E = f(I_{\text{в}})$ идет выше характеристики цепи возбуждения (прямой $U = I_{\text{в}} \cdot R_{\text{в}}$). Точка пересечения этих характеристик определяет конечную ЭДС, а следовательно, и напряжение, до которого возбуждается генератор. Если же $E \leq I_{\text{в}} \cdot R_{\text{в}}$, самовозбуждения машины не происходит. Сопротивление цепи возбуждения, определяющее начало самовозбуждения (порог самовозбуждения), называется **критическим сопротивлением**. В этом случае напряжение на зажимах генератора неустойчиво.

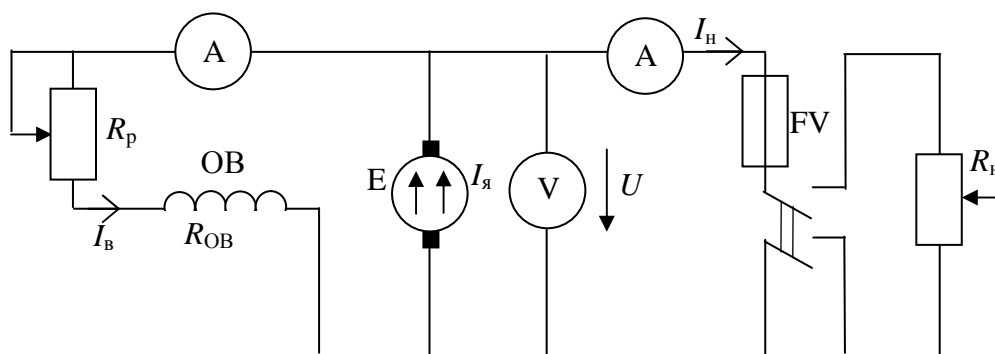


Рисунок 10.12 – Схема генератора с параллельным возбуждением

Эта особенность снижает регулировочные свойства генератора. У генераторов нормального исполнения устойчивое напряжение в режиме холостого хода составляет $(0,6-0,7) \cdot U_{\text{н}}$. Для расширения диапазона регулирования напряжения применяют специальные полюса с насыщающимися участками, что обеспечивает устойчивое напряжение с $0,2 \cdot U_{\text{н}}$.

В нагрузочном режиме напряжение на зажимах машины снижается в большей мере, чем у генератора с независимым возбуждением. Это объясняется тем, что напряжение уменьшается не только из-за увеличения падения напряжения в цепи якоря ($U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}$) и реакции якоря, но и вследствие уменьшения тока возбуждения, так как

$$I_{\epsilon} = \frac{U}{R_{\epsilon}} = \frac{E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{R_{\epsilon}} \quad (10.11)$$

Влияние реакции якоря и уменьшение тока возбуждения особенно резко проявляется при увеличении нагрузки сверх номинальной. Изменение сопротивления нагрузки ниже некоторого определенного значения

приводит к уменьшению тока нагрузки в связи с резким уменьшением ЭДС генератора.

Наибольший возможный ток генератора называется критическим током. Он составляет $I_{кр} = (2-2,5) \cdot I_n$. Ток короткого замыкания генераторов с параллельным возбуждением определяется остаточной ЭДС и сопротивлением якоря

$$I_{к.з} = \frac{E_{ост}}{R_{я}}. \quad (10.12)$$

У машин большой мощности ток короткого замыкания несколько больше номинального тока. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением показана на рисунке 10.13, б. Снижение напряжения на зажимах якоря при увеличении нагрузки генератора до номинальной составляет

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100 = 10 \div 15\%. \quad (10.13)$$

Напряжение генератора можно поддерживать постоянным, изменяя ток возбуждения регулировочным реостатом R_p .

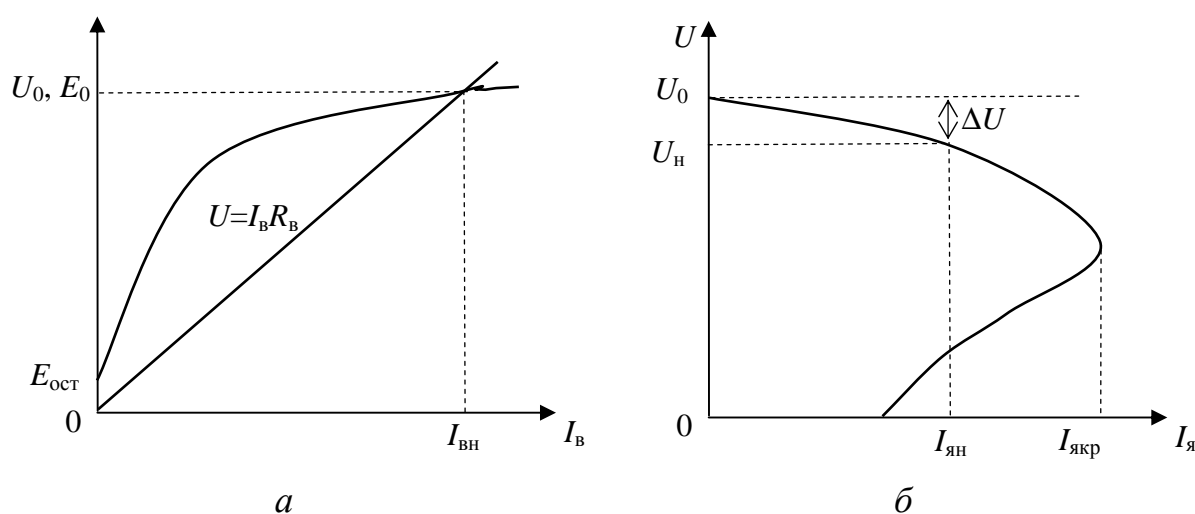


Рисунок 10.13 – Характеристики генератора с параллельным возбуждением: а – характеристика холостого хода; б – внешняя характеристика

Генераторы с параллельным возбуждением применяют в тех случаях, когда необходимо поддерживать напряжение на нагрузке постоянным или при регулировании напряжения в определенных пределах.

10.8.3 Генераторы с последовательным возбуждением. Электрическая схема генератора приведена на рисунке 10.14, а. Обмотка возбуждения этого генератора включается последовательно с якорем, рассчитывается на ток якоря, так как $I_B = I_я = I_n$ и имеет малое число витков провода большого сечения. Характеристика холостого хода генератора с последо-

вательным возбуждением может быть снята только при питании обмотки возбуждения от постороннего источника и имеет такой же вид, как у генератора с независимым возбуждением.

Самовозбуждение генератора происходит при замкнутой цепи якоря. Ток якоря, протекая по обмотке возбуждения, увеличивает магнитное поле полюсов, а следовательно, ЭДС машины и напряжение на зажимах якоря, так как

$$U = E - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{с}}). \quad (10.14)$$

С увеличением тока нагрузки растут ток якоря и напряжение. После насыщения магнитной цепи машины рост напряжения прекращается, и при дальнейшем увеличении тока нагрузки напряжение начинает снижаться из-за увеличения падения его в сопротивлениях якоря и обмотки возбуждения и размагничивающего действия реакции якоря.

Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением приведена на рисунке 10.14, б. Генератор может применяться для питания постоянной нагрузки.

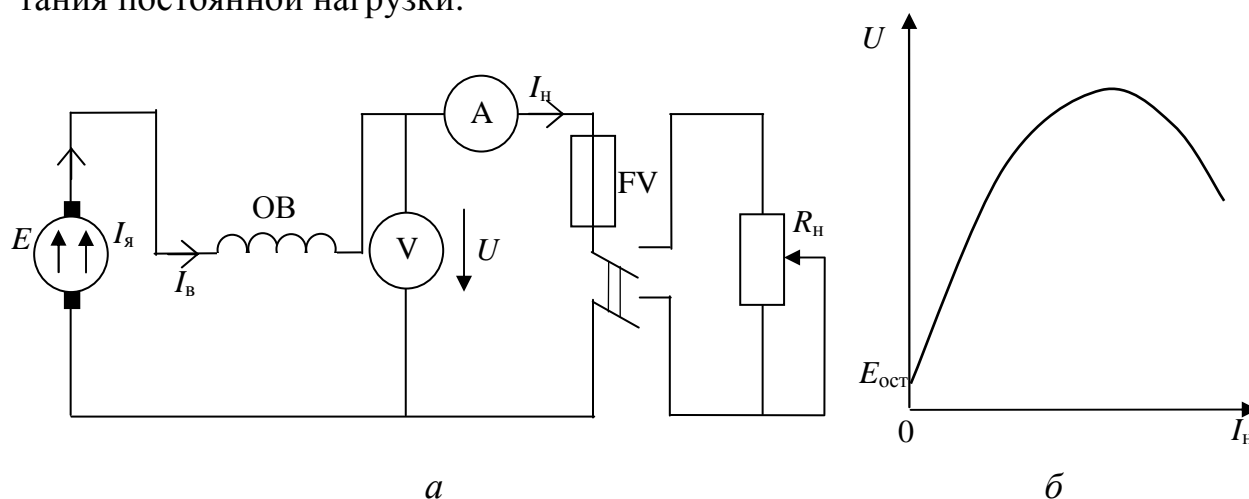


Рисунок 10.14 – Генератор с последовательным возбуждением:
а – электрическая схема; б – внешняя характеристика

Свойство последовательной обмотки возбуждения увеличивать напряжение генератора с ростом нагрузки используется для компенсации снижения напряжения, наблюдаемого у генераторов с параллельным возбуждением.

10.8.4 Генератор со смешанным возбуждением. Электрическая схема генератора приведена на рисунке 10.15, а. У генератора имеется две обмотки возбуждения: параллельная ОВШ (шунтовая), включаемая параллельно якорю, и последовательная ОВС (серийная). Параллельная обмотка рассчитывается на небольшой ток $I_{\text{в.ш}} = (0,01-0,03) \cdot I_{\text{н}}$, имеет большое число витков провода малого сечения. Последовательная обмотка рассчитывается на ток нагрузки $I_{\text{н}} = I_{\text{в.с}} = I_{\text{я}} - I_{\text{в.ш}}$ и имеет малое число витков провода большого сечения. Благодаря наличию параллельной обмотки генератор со смешанным возбуждением может самовозбуждаться и при разомк-

нутой цепи нагрузки. Характеристика холостого хода имеет такой же вид, как и у генератора с параллельным возбуждением.

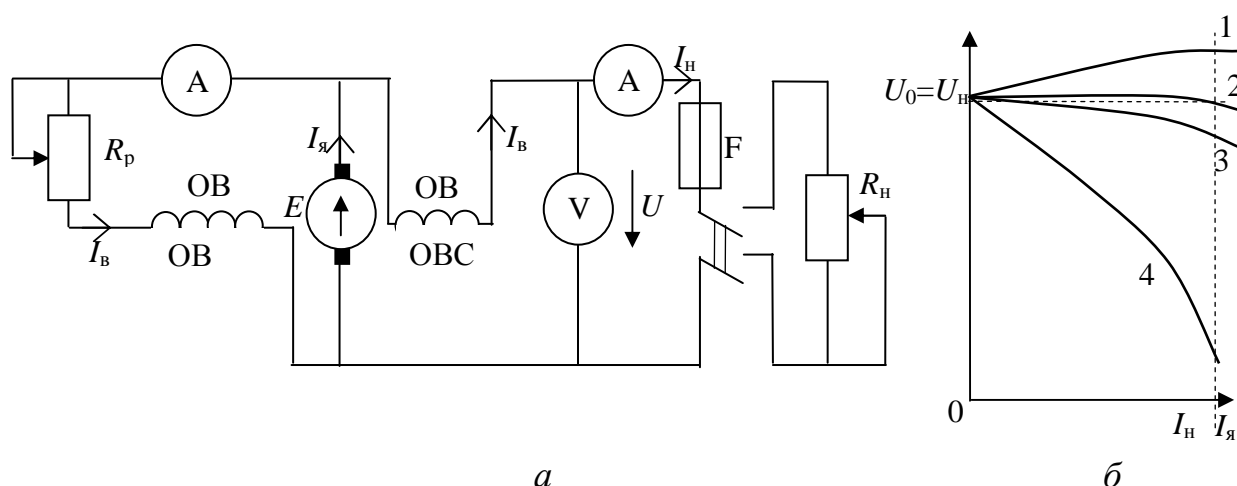


Рисунок 10.15 – Генератор со смешанным возбуждением:
а – электрическая схема; б – внешняя характеристика

При включении нагрузки появляется ток в последовательной обмотке возбуждения, который создает дополнительное магнитное поле $\Phi_c = f(I_n)$. Если эта обмотка включена так, что магнитные потоки обеих обмоток возбуждения складываются, т.е. магнитный поток полюсов $\Phi = \Phi_{ш} + \Phi_c$, то ЭДС машины при увеличении нагрузки будет возрастать, так как увеличивается поток последовательной обмотки. Это позволяет компенсировать снижение напряжения на зажимах машины от реакции якоря и от падения напряжения в сопротивлениях якоря и последовательной обмотки возбуждения, так как

$$U = c \cdot n \cdot (\Phi_{ш} + \Phi_c) - I_a \cdot (R_a + R_{с.с.}) \quad (10.15)$$

Поэтому внешняя характеристика генератора (кривая 2, рис. 10.15, б) идет выше характеристики генератора с параллельным возбуждением (кривая 1). Путем регулирования R_p можно получить увеличение напряжения при росте нагрузки (кривая 3).

Генератор с согласованным включением последовательной и параллельной обмоток возбуждения применяется в тех случаях, когда необходимо регулировать напряжение потребителя (изменяя ток $I_{в.ш}$ сопротивлением R_p), или когда необходимо автоматически поддерживать постоянное напряжение при изменяющейся нагрузке.

В некоторых случаях, например, в сварочных агрегатах, необходимо, чтобы при росте нагрузки напряжение уменьшалось более резко, чем у генератора с параллельным возбуждением. Для получения такой падающей характеристики (кривая 4, рис. 10.15, б) последовательную обмотку включают встречно, чтобы результирующий магнитный поток с ростом нагрузки уменьшался $\Phi = \Phi_{ш} - \Phi_c$. Тогда напряжение

$$U = c \cdot n \cdot (\Phi_{ш} - \Phi_c) - I_a \cdot (R_a + R_{с.с.}) \quad (10.16)$$

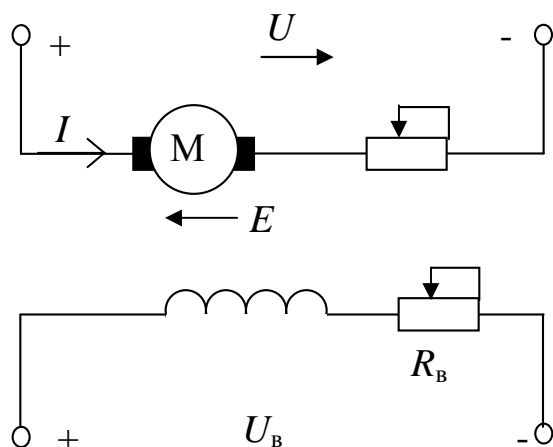
также будет падать с ростом тока нагрузки.

10.9 Электродвигатели постоянного тока

10.9.1 Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.

Схема включения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением представлена на рисунке 10.16. Якорь двигателя M и его обмотка возбуждения OB обычно получают питание от разных, независимых друг от друга источников напряжения U и U_B , что позволяет отдельно регулировать напряжение на якоре двигателя и на обмотке возбуждения и выполнять их на разное номинальное напряжение. Только при наличии сети постоянного тока обмотка возбуждения питается от того же источника напряжения, что и якорь двигателя. Но и в этом случае ток возбуждения I_B не зависит от тока I якоря двигателя.

Направления тока I и ЭДС вращения двигателя E , показанные на рисунке 10.16, соответствуют двигательному режиму работы, когда электрическая энергия потребляется двигателем из сети (от источника напряжения U) и преобразуется в механическую энергию. На валу двигателя возникает



вращающий электромагнитный момент $M_{эм}$. Полезный вращающий момент M на валу двигателя меньше электромагнитного на значение противодействующего момента, создаваемого в машине силами трения и равно моменту $M_{хх}$ в режиме холостого хода, т. е. $M = M_{эм} - M_{хх}$.

Из механики известно, что механическая мощность двигателя P может быть выражена через вращающий момент и угловую скорость соотношением

Рисунок 10.16 – Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

$$P = \omega \cdot M, \quad (10.17)$$

где $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ – угловая скорость вращения якоря, рад/с;

n – частота вращения, об/мин.

Тогда полезный вращающий момент двигателя M (Н·м), выраженный через полезную мощность P , кВт, определится следующим образом

$$M = \frac{P}{\omega}. \quad (10.18)$$

Зависимость между M и ω двигателя определяется его механической характеристикой. Аналитическое выражение механической характеристики двигателя может быть получено из уравнения равновесия напряжений, составленного для якорной цепи схемы (рис. 10.16). При установившемся режиме работы двигателя приложенное напряжение U уравнивается падением напряжения в якорной цепи $I \cdot R$ и наведенной в якоре ЭДС вращения E , т. е.

$$U = I \cdot R + E, \quad (10.19)$$

где I – ток в якорной цепи двигателя, А;

R – суммарное сопротивление якорной цепи, Ом, включающее внешнее сопротивление резистора R_p и внутреннее сопротивление якоря двигателя $R_{я}$.

ЭДС вращения определяется скоростью вращения якоря и величиной магнитного потока

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (10.20)$$

где k – коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя;

$k = p \cdot N / 2\pi \cdot a$ (p – число пар полюсов двигателя;

N – число активных проводников обмотки якоря;

a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря);

Φ и ω – соответственно магнитный поток, Вб, и угловая скорость двигателя, рад/с.

Если в (10.19) вместо E подставить ее значение из (10.20), получим уравнение для скорости двигателя

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}, \quad (10.21)$$

которое представляет собой зависимость скорости двигателя от тока якоря. Такую зависимость $\omega = f(I)$ называют **электро механической характеристикой двигателя**.

Для получения уравнения механической характеристики необходимо найти зависимость скорости от момента двигателя. Момент, развиваемый двигателем, связан с током якоря и магнитным потоком зависимостью

$$M = k \cdot \Phi \cdot I. \quad (10.22)$$

Подставим в (10.21) значение тока I , найденное из (10.22), и получим выражение для **механической характеристики двигателя**:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \cdot R}{k^2 \cdot \Phi^2}, \quad (10.23)$$

или

$$\omega = \frac{U}{c} - \frac{M \cdot R}{c^2}, \quad (10.24)$$

где

$$c = k \cdot \Phi. \quad (10.25)$$

Механическая характеристика двигателя независимого возбуждения при неизменных параметрах U , Φ и R является прямой линией. Изменяя тот

или иной параметр механической характеристики, можно получать различные скорости двигателя, т. е. регулировать скорость его вращения.

Рассмотрим влияние сопротивления якорной цепи на механические характеристики двигателя.

На рисунке 10.17 представлены механические характеристики двигателя независимого возбуждения для различных сопротивлений якорной цепи.

Как видно из (10.17), при $M = 0$ все характеристики проходят через одну точку, лежащую на оси ординат. Угловая скорость в этой точке имеет значение, не зависящее от сопротивления якорной цепи. Эта скорость носит название скорости идеального холостого хода ω_0 и определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}. \quad (10.26)$$

При скорости идеального холостого хода, когда ток в якорной цепи равен нулю, ЭДС якоря, направленная навстречу приложенному напряжению, равна ему по абсолютному значению. Если двигатель до приложения нагрузки работал с угловой скоростью ω_0 , то при появлении на его валу момента сопротивления угловая скорость будет снижаться. Следствием этого будет уменьшение ЭДС вращения E в соответствии с (10.20) и увеличение тока якоря в соответствии с (10.19) и момента двигателя по (10.22). Угловая скорость будет снижаться до тех пор, пока момент двигателя не сравняется с моментом сопротивления. Разность значений установившихся скоростей электропривода до и после приложения заданной статической нагрузки называется **статическим падением скорости**.

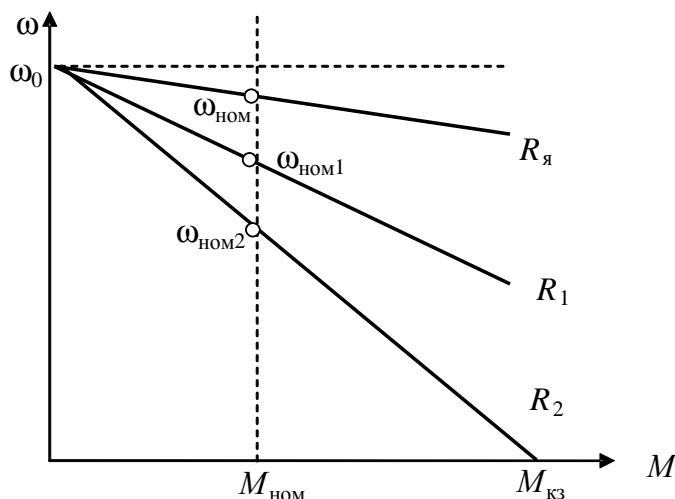


Рисунок 10.17 – Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Второй член (10.24) характеризует собой статическое падение угловой скорости (перепад) относительно угловой скорости идеального холостого хода:

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot R}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (10.27)$$

Таким образом, уравнение для скорости двигателя может быть записано следующим образом:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (10.28)$$

Верхняя характеристика на рисунке 10.17 называется естественной. **Естественной характеристикой** называется такая характеристика двигателя, которая получается при отсутствии внешних сопротивлений в якорной цепи и номинальных

значениях напряжения и магнитного потока двигателя. Жесткость естественной характеристики зависит от внутреннего сопротивления якорной цепи двигателя $R_{\text{я}}$. Внутреннее сопротивление якорной цепи включает собственное сопротивление якорной обмотки, сопротивление обмотки дополнительных полюсов, компенсационной обмотки и щеток. Соответственно перепад скорости для естественной характеристики

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{k^2 \cdot \Phi_{\text{ном}}^2}.$$

По (10.27) определяется статическое падение скорости для любой из характеристик двигателя независимого возбуждения, представленных на рисунке 10.17. Например, при дополнительно включенном реостате, имеющем сопротивление $R_{\text{р}}$, статическое падение скорости определится из соотношения

$$\Delta\omega = \frac{M \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{р}})}{k^2 \cdot \Phi^2}. \quad (10.29)$$

Разделив (10.28) на ω_0 , получим статическое падение скорости в относительных единицах:

$$\Delta\omega^* = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Если в якорную цепь двигателя включено дополнительное сопротивление (реостат), то механические характеристики, получаемые при этом, называются искусственными или **реостатными характеристиками**. Эти характеристики пересекаются все в одной точке ω_0 . Реостатные характеристики так же линейны, как и естественная характеристика, но имеют значительно больший наклон к оси моментов, т. е. обладают меньшей жесткостью. Чем больше введенное в цепь якоря сопротивление реостата, тем круче идет характеристика, тем меньше ее жесткость.

Из уравнения электрического равновесия цепи якоря двигателя (10.19) следует, что в момент пуска при $\omega = 0$, ЭДС вращения $E = 0$, и пусковой ток двигателя $I_{\text{н}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$ в 10–30 раз превышает номинальное значение. Поэтому прямой пуск двигателя, т. е. непосредственное включение якоря на напряжение сети, недопустимо. Чтобы ограничить большой пусковой ток якоря, перед пуском последовательно с якорем включают пусковой реостат $R_{\text{п}}$ с небольшим сопротивлением.

10.9.2 Двигатель с последовательным возбуждением. Обмотка возбуждения двигателя включается последовательно с якорем (см. рис. 10.18), и потому ток в нагрузке является током якоря и током возбуждения ($I = I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$). Это существенно влияет на свойства и характеристики двигателя, так как изменение момента нагрузки неизбежно сопровождается изменением магнитного потока статора.

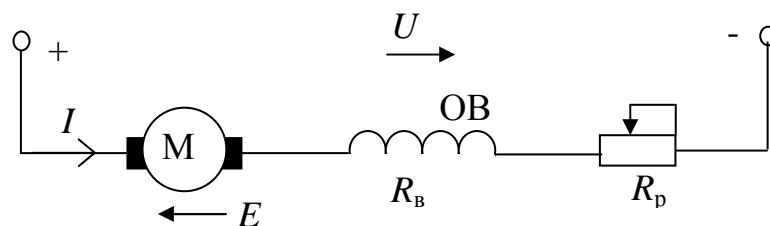


Рисунок 10.18. – Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Для электродвигателя последовательного возбуждения уравнение электромеханической характеристики, так же как и для двигателя независимого возбуждения, имеет вид:

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{k \cdot \Phi}, \quad (10.30)$$

где $R = R_{\text{я}} + R_{\text{В}} + R_{\text{р}}$ – суммарное сопротивление якорной цепи.

В отличие от двигателя независимого возбуждения здесь магнитный поток Φ является функцией тока якоря I . Эта зависимость (см. рис. 10.19) называется кривой намагничивания. Так как нет точного аналитического выражения для кривой намагничивания, то трудно дать и точное аналитическое выражение для механической характеристики двигателя последовательного возбуждения. Если предположить линейную зависимость между потоком и током якоря, т. е. считать $\Phi = \alpha \cdot I$, то момент двигателя можно выразить следующим образом

$$M = k \cdot \Phi \cdot I = \alpha \cdot k \cdot I^2. \quad (10.31)$$

Подставив в (10.30) значение тока из (10.31), получим выражение для механической характеристики:

$$\omega = \frac{U}{\alpha k \sqrt{\frac{M}{\alpha k}}} - \frac{R}{\alpha k} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B. \quad (10.32)$$

Отсюда следует, что при ненасыщенной магнитной цепи двигателя механическая характеристика изображается кривой (рис. 10.20), для которой ось ординат является асимптотой. Особенностью механической характеристики двигателя последовательного возбуждения является ее большая крутизна в области малых значений момента. Значительное увеличение угловой скорости при малых нагрузках вызвано соответствующим уменьшением магнитного потока.

Уравнение (10.32) дает лишь общее представление о механической характеристике двигателя последовательного возбуждения. В расчетах этим уравнением пользоваться нельзя, так как машин с ненасыщенной магнитной системой не строят. Вследствие того, что действительные механические характеристики сильно отличаются от кривой, выраженной уравнением (10.32), построение характеристик приходится вести графоаналитическими способами.

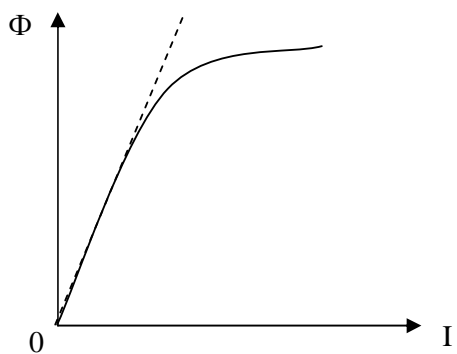


Рисунок 10.19 – Кривая намагничивания двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

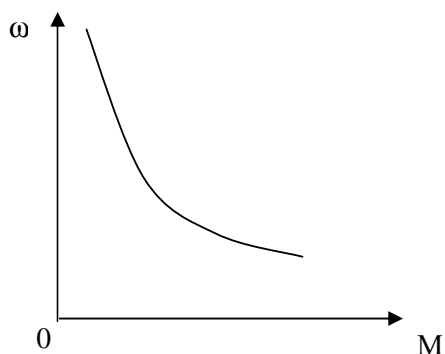


Рисунок 10.20 – Естественная механическая характеристика двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Обычно построение искусственных характеристик производится на основании данных каталогов, где приводятся естественные характеристики: $\omega = f(I)$ и $M = f(I)$. Для серии двигателей определенного типа эти характеристики даются в относительных единицах: $\omega^* = f(I^*)$ и $M^* = f(I^*)$. Такие универсальные характеристики показаны на рисунке 10.21.

В каталогах дается также зависимость момента на валу двигателя от тока. При построении механических характеристик принимается зависимость угловой скорости от электромагнитного момента. Это практически допустимо ввиду небольшой разницы между электромагнитным моментом и моментом на валу.

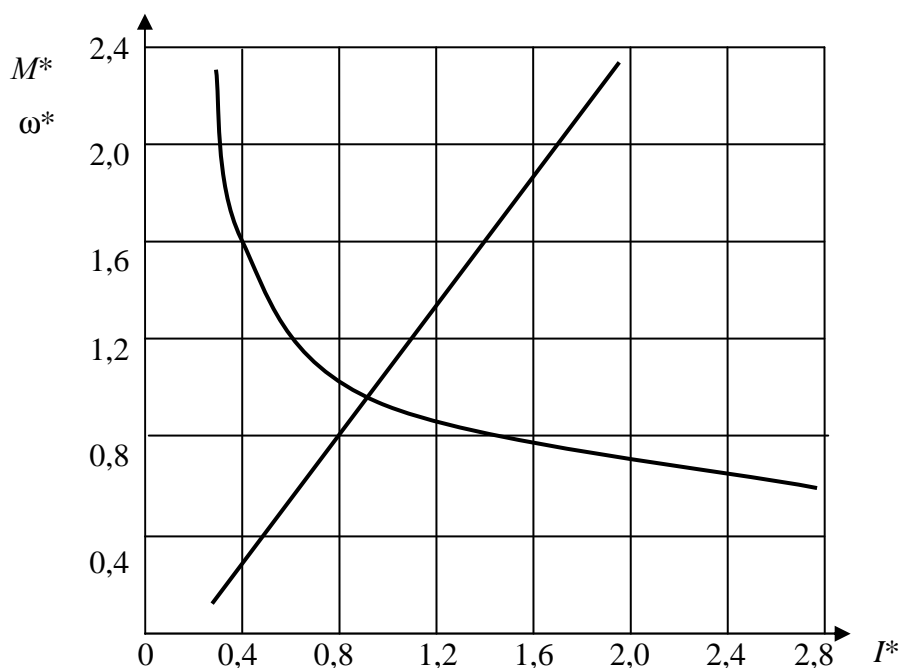


Рисунок 10.21 – Зависимость момента и угловой скорости от тока якоря двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Искусственные характеристики могут быть получены следующим путем. Из (10.30) при $R_p = 0$ получаем уравнение естественной характеристики:

$$\omega_e = \frac{U - I \cdot R_o}{k \cdot \Phi},$$

где $R_{\partial} = R_{\text{я}} + R_{\text{в}}$, и записываем его следующим образом

$$\omega_e = \frac{U}{k \cdot \Phi} \left(1 - \frac{I \cdot R_{\partial}}{U} \right). \quad (10.33)$$

При включении в якорную цепь двигателя дополнительного резистора R_p , двигатель будет работать на реостатной характеристике, для которой

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} \left(1 - \frac{I(R_{\partial} + R_p)}{U} \right). \quad (10.34)$$

Разделив (10.34) на (10.33) получим:

$$\frac{\omega}{\omega_e} = \frac{U - I(R_{\partial} + R_p)}{U - I \cdot R_{\partial}},$$

откуда

$$\omega = \omega_e \frac{U - I(R_{\partial} + R_p)}{U - I \cdot R_{\partial}}. \quad (10.35)$$

Или в относительных единицах

$$\omega^* = \omega_e^* \frac{1 - I^* \cdot R^*}{1 - I^* \cdot R_{\partial}^*}, \quad (10.36)$$

где $R^* = \frac{R_{\partial} + R_p}{R_{\text{ном}}}$ – суммарное сопротивление якорной цепи в относительных единицах, $R_{\partial}^* = \frac{R_{\partial}}{R_{\text{ном}}}$, $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}$, $\omega_e^* = \frac{\omega_e}{\omega_{\text{ном}}}$, $I^* = \frac{I}{I_{\text{ном}}}$.

Порядок построения реостатной характеристики сводится к тому, что, задаваясь некоторыми произвольными значениями тока I_1^* , по имеющейся естественной характеристике находят ω_{e1}^* . Затем по (10.36) при определенном $R^* = R_1^*$, для которого строится реостатная характеристика, и том же I_1^* определяют искомое значение ω_1^* . Таким же образом для других значений I^* определяют искомые значения скорости ω_2^* , ω_3^* и т. д. На рисунке 10.22 показаны естественная характеристика двигателя последовательного возбуждения R_d^* и реостатная R_1^* . С увеличением сопротивления цепи якоря скорость двигателя при том же моменте уменьшается, и характеристика смещается вниз. Жесткость характеристики уменьшается с ростом дополнительного сопротивления в якорной цепи. Особенностью механических характеристик рассматриваемого двигателя является невозможность получения режима идеального холостого хода.

При нагрузке ниже 15-20 % номинальной работа двигателя практически недопустима из-за чрезмерного увеличения скорости якоря.

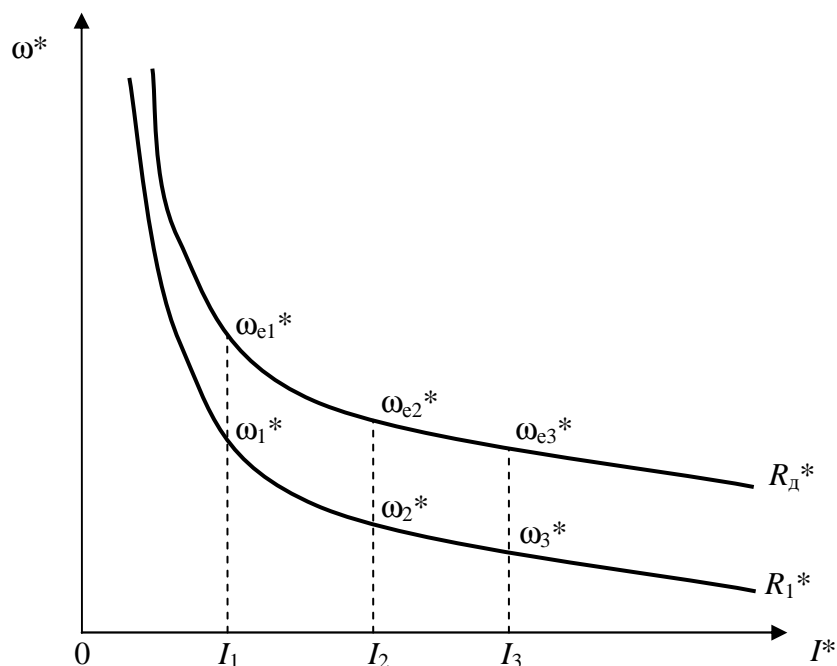


Рисунок 10.22 – Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Двигатели последовательного возбуждения широко применяются в подъемных установках (крановые двигатели) и на электротранспорте (тяговые двигатели), где требуется большой вращающий момент (особенно при пуске).

10.9.4 Двигатель смешанного возбуждения (рис. 10.23) имеет две обмотки возбуждения: независимую ОВ2 и последовательную ОВ1, поэтому его механические характеристики занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей независимого и последовательного возбуждения. Механическая характеристика рассматриваемого двигателя вследствие изменения магнитного потока при изменении нагрузки не имеет аналитического выражения, поэтому при расчетах обычно пользуются естественными универсальными характеристиками момента и скорости от тока якоря, которые даются в каталогах. Такие характеристики в относительных единицах представлены на рисунке 10.24.

В отличие от двигателя последовательного возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет конечное значение скорости идеально холостого хода. Эта скорость определяется только магнитным потоком, созданным магнитодвижущей силой независимой обмотки, и равна:

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi_0},$$

где Φ_0 - магнитный поток, созданный током возбуждения независимой обмотки.

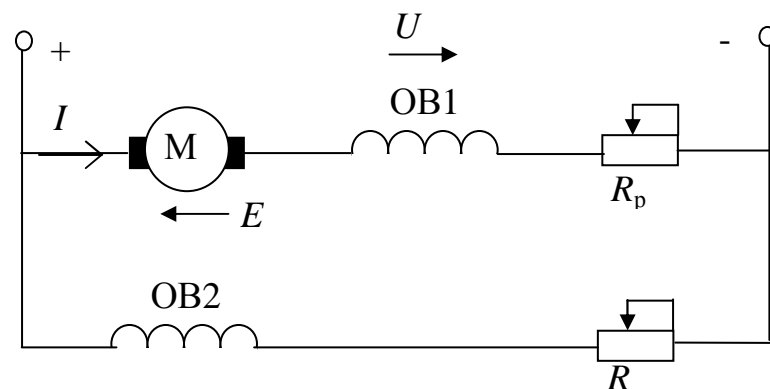


Рисунок 10.23 – Схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

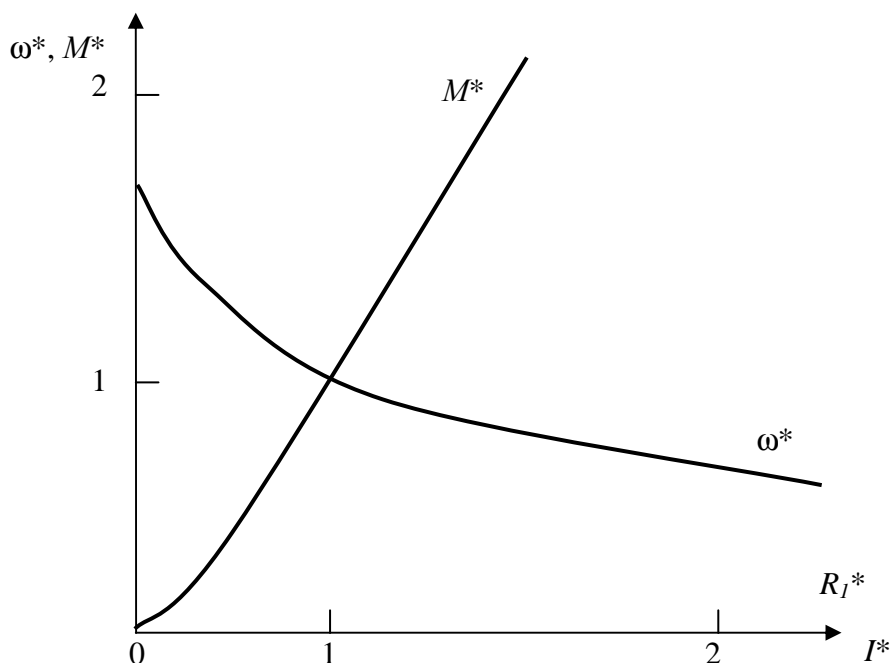


Рисунок 10.24 – Зависимость момента и угловой скорости от тока якоря для двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Соотношения магнитодвижущих сил независимой и последовательной обмоток различны для двигателей разных серий. Наиболее употребительным является соотношение, которое при номинальном токе дает равенство магнитодвижущих сил обеих обмоток возбуждения. Скорость двигателя смешанного возбуждения при малых нагрузках изменяется значительно, а затем при увеличении нагрузки медленно уменьшается почти по прямой, как у двигателя независимого возбуждения. Происходит это вследствие того, что при больших нагрузках наступает насыщение машины. И хотя магнитодвижущая сила последовательной обмотки возрастает, магнитный поток уже почти не изменяется.

Для расчета реостатных характеристик может быть применен рассмотренный выше порядок построения характеристик двигателя последовательного возбуждения.

Выводы

1. Электрическая машина постоянного тока может работать в режиме генератора и в режиме электродвигателя. В генераторе постоянного тока происходит преобразование механической энергии, подводимой от первичного двигателя, в электрическую энергию. В электродвигателе постоянного тока осуществляется преобразование электрической энергии во вращательное движение якоря электродвигателя.

2. Реакция якоря проявляется в искажении основного магнитного потока, в результате чего в генераторах уменьшается ЭДС, а в двигателях уменьшается электромагнитный момент.

3. Для борьбы с искрением в процессе коммутации секций обмотки якоря применяются добавочные полюса, создающие в зоне коммутации магнитное поле, направленное навстречу полю якоря.

4. Для выпрямления переменного тока якоря для внешней цепи у генераторов, а у двигателей - для изменения направления тока в проводниках обмотки якоря при его вращении предназначен коллектор.

5. Основными характеристиками машин постоянного тока являются: для генераторов – внешняя характеристика $U = f(I_{\text{я}})$, для электродвигателей – скоростная $\omega = f(I_{\text{я}})$ и механическая $\omega = f(M)$ характеристики.

6. ЭДС обмотки якоря машины постоянного тока определяется конструкцией машины, скоростью вращения якоря и величиной магнитного потока, создаваемого системой возбуждения.

7. В машинах с независимым возбуждением обмотка возбуждения питается от постороннего источника электрической энергии, непосредственно не связанного с якорными цепями машины.

8. В машинах постоянного тока с параллельным возбуждением обмотка возбуждения соединена параллельно с цепью якоря. При необходимости обмотку возбуждения этой машины можно включить и по схеме с независимым возбуждением.

9. В машинах с последовательным возбуждением обмотка возбуждения соединена последовательно с цепью якоря. Ее выполняют проводами большого сечения с малым количеством витков и малым сопротивлением.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные части машины постоянного тока и объясните их конструкцию.

2. Какие свойства электрических машин постоянного тока обусловили их широкое применение?

3. Объясните принцип действия генератора постоянного тока и назначение коллектора у генератора и у двигателя.

4. Как можно изменить ЭДС обмотки якоря генератора? От каких параметров она зависит?

5. По какой причине в машине постоянного тока возникает реакция якоря? Объясните ее влияние на величину ЭДС МПТ.

6. Объясните сущность коммутации машины постоянного тока.
7. Как уменьшить вредное влияние реакции якоря на работу машины постоянного тока?
8. Охарактеризуйте потери энергии, сопровождающие процессы преобразования механической энергии в электрическую и наоборот, происходящие в машине постоянного тока. На какой параметр МПТ влияет величина потерь энергии?
9. Классификация генераторов постоянного тока по способу возбуждения.
10. Каковы особенности генератора с независимым возбуждением?
11. Объясните вид внешней характеристики и возможность регулирования напряжения генераторов с независимым возбуждением.
12. Объясните принцип и условия самовозбуждения генераторов постоянного тока.
13. Каковы особенности внешней характеристики генератора с параллельным возбуждением?
14. В чем заключаются достоинства и недостатки генератора с последовательным возбуждением?
15. С какой целью в машинах с последовательным возбуждением обмотку возбуждения выполняют проводом большого сечения с малым количеством витков и малым сопротивлением.
16. Какой вид имеет внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением при согласованном и встречном включении обмоток возбуждения?
17. Недостатки обычного генератора с независимым возбуждением как усилителя мощности.
18. Объясните принцип действия электромашинного усилителя мощности с поперечным полем.
19. Объясните принцип действия двигателя постоянного тока.
20. Вывести уравнение вращающего момента двигателя. Как изменить направление вращения якоря двигателя?
21. Каково назначение пускового реостата и как выбирается величина его сопротивления?
22. Особенности схемы двигателя с параллельным возбуждением.
23. Как выполняется регулирование скорости двигателя изменением тока возбуждения. Почему разрыв цепи возбуждения опасен для двигателя?
24. Как изменяется скорость двигателя с последовательным возбуждением при изменении нагрузки на его валу? Почему работа с малой нагрузкой для двигателя недопустима?
25. Как осуществляется регулирование скорости двигателя с последовательным возбуждением.
26. Как изменяются вращающий момент и скорость двигателя со смешанным возбуждением с ростом нагрузки?
27. Какие из потерь в машине постоянного тока зависят от нагрузки? Какие потери являются постоянными?

11 АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Ключевые понятия: статор, ротор, вращающееся магнитное поле, скольжение, двигательный (генераторный, противовключения) режим работы АМ, коэффициент трансформации ЭДС АД, электрическое равновесие цепи статора (ротора), схема замещения АД, полная векторная диаграмма АД, характеристика холостого хода, скоростная характеристика, механическая характеристика.

Асинхронные машины преимущественно применяются в качестве двигателей. По оценкам экспертов из общего количества электрических двигателей, находящихся в эксплуатации, на асинхронные приходится 90-95%. Простота, высокая надежность в работе, малые габаритные размеры и низкая стоимость трехфазных АД мощностью более 0,5 кВт обусловили их широкое применение в электроприводах металлорежущих станков, подъемно-транспортных механизмов, кузнечно-прессовых машин, насосов, вентиляторов, компрессоров и других механизмов.

Асинхронные двигатели мощностью до 0,5 кВт выполняются одно- и двухфазными. Их применяют в системах автоматики, в бытовых приборах, в электрифицированном инструменте и др.

11.1 Устройство и принцип действия трехфазной асинхронной машины

11.1.1 Устройство асинхронной машины. Асинхронная машина, как и любая электрическая машина, обратима и может работать в двигательном и генераторном режимах. В подавляющем большинстве случаев асинхронные машины применяют в качестве двигателей.

Основными конструктивными элементами асинхронного двигателя являются *неподвижный статор и вращающийся ротор* (см. рис. 11.1 и рис. 11.2). Между статором и ротором имеется воздушный зазор. Статор состоит из станины 1, являющейся одновременно корпусом двигателя, и закрепленных в ней магнитопровода 2 и обмотки 3.

Магнитопровод статора, представляющий собой основную часть магнитной цепи машины, набирают из штампованных изолированных друг от друга листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. На внутренней цилиндрической поверхности магнитопровода имеются пазы, в которые укладываются проводники обмотки статора. К станине крепятся два боковых щита 4 со сквозными центральными отверстиями для подшипников вала ротора.

Ротор асинхронного двигателя 5 (рис. 11.2) состоит из пакета магнитопровода, набранного из штампованных листов электротехнической стали, и обмотки. Насаженный на вал 6 пакет магнитопровода имеет форму

цилиндра, на внешней поверхности которого выполнены пазы, в которых размещается обмотка.

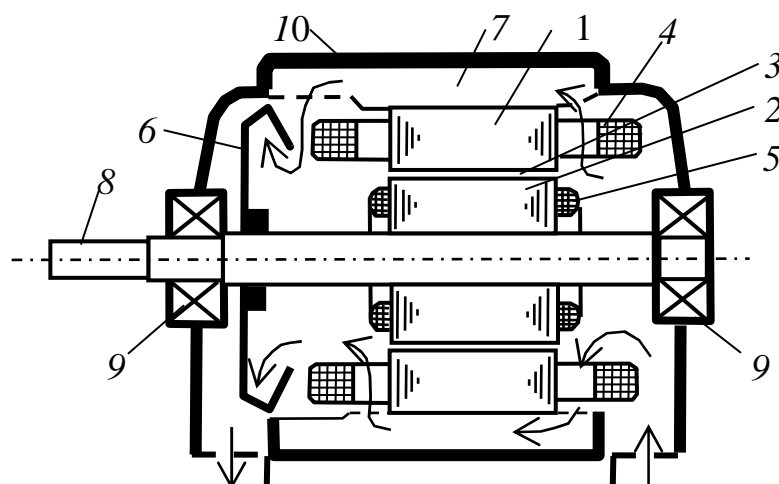


Рисунок 11.1 – Устройство асинхронного двигателя: 1 – сердечник статора; 2 – сердечник ротора; 3 – воздушный зазор; 4 – обмотка статора; 5 – обмотка ротора; 6 – вентилятор; 7 – вентиляционные каналы (стрелками показано направление движения охлаждающего воздуха по каналам); 8 – вал; 9 – подшипники; 10 – станина

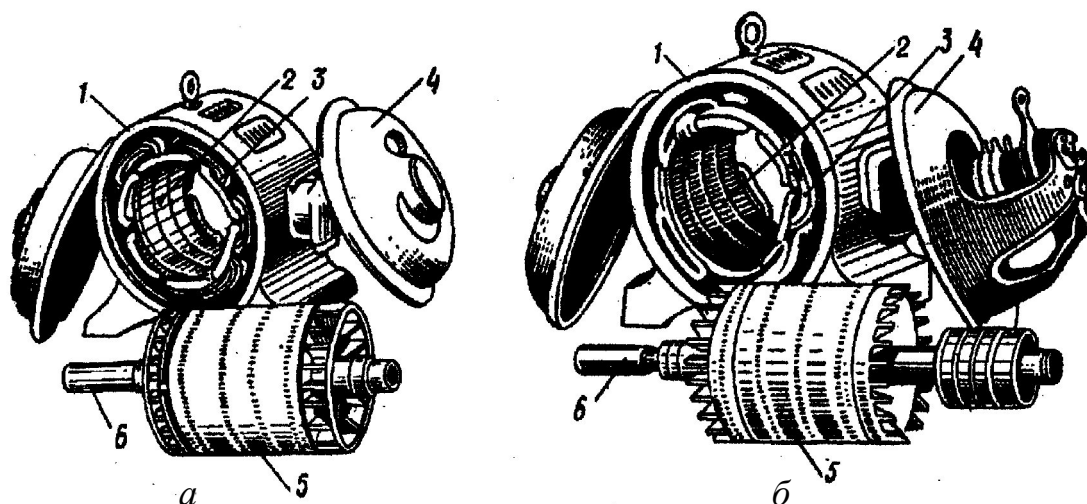


Рисунок 11.2 – Конструктивные элементы АД:
а – АД с короткозамкнутым ротором; б – АД с фазным ротором

В зависимости от типа обмотки ротор АД может быть короткозамкнутым или фазным. В пазы короткозамкнутого ротора уложены медные стержни, соединяющиеся с торцов короткозамкнутыми кольцами. Такая обмотка имеет вид «беличьей клетки» (рис. 11.3, а). Условное графическое обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведено на рисунке 11.3, а.

В пазах фазного ротора укладывают проводники секций трехфазной обмотки, обычно соединяемой в звезду (рис. 11.3, б). Свободные выводы фаз обмотки ротора (обозначаемые P_1 , P_2 , P_3) присоединяются к трем (по числу фаз) изолированным друг от друга контактными кольцам. На кольца

наложены укрепленные в щеткодержателях щетки, с помощью которых цепь вращающейся обмотки ротора соединяется с регулировочным или пусковым реостатом. Условное графическое обозначение асинхронного двигателя с фазным ротором приведено на рисунке 11.3, б.

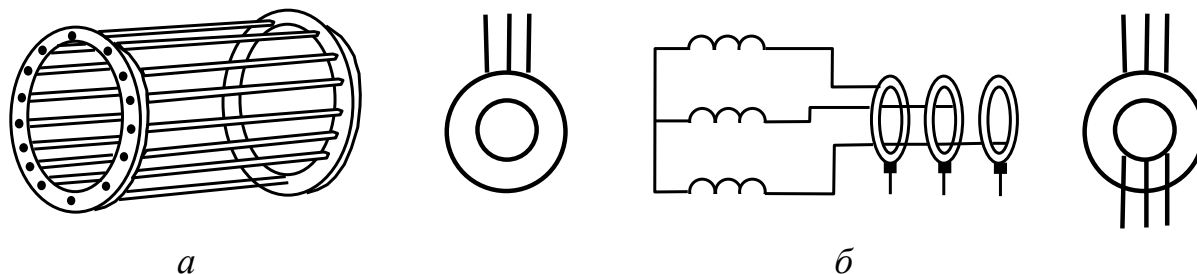


Рисунок 11.3 – Обмотки ротора АД: а – короткозамкнутая;
б – с фазным ротором

11.1.2 Принцип работы АМ основан на использовании вращающегося магнитного поля. При подключении к сети трехфазной обмотки статора создается вращающееся магнитное поле, угловая скорость которого определяется частотой сети f и числом пар полюсов обмотки p

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f}{p}, \text{ рад/с.}$$

Пересекая проводники обмотки статора и ротора, это поле согласно закону электромагнитной индукции наводит в обмотках ЭДС. При замкнутой обмотке ротора в его цепи протекает ток, который в результате взаимодействия с результирующим магнитным полем создает электромагнитный момент на валу. Если этот момент превышает момент сопротивления на валу двигателя, вал начинает вращаться и приводит в движение рабочий механизм. Обычно угловая скорость ротора ω_2 не равна угловой скорости магнитного поля ω_1 , называемой синхронной. Отсюда и название двигателя асинхронный, т. е. несинхронный.

Работа асинхронной машины характеризуется *скольжением* s , которое представляет собой *относительную разность угловых скоростей поля ω_1 и ротора ω_2* :

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}. \quad (11.1)$$

Значение и знак скольжения, зависящие от угловой скорости ротора относительно магнитного поля, определяют режим работы асинхронной машины. Так, в режиме идеального холостого хода ротор и магнитное поле вращаются с одинаковой частотой в одном направлении, т. е. ротор неподвижен относительно вращающегося магнитного поля, и скольжение s равно нулю. ЭДС в обмотке ротора не индуцируется, ток ротора и электромагнитный момент машины равны нулю. При пуске в первый момент вре-

мени ротор неподвижен: $\omega_2 = 0$, $s = 1$, таким образом, скольжение в двигательном режиме изменяется от $s = 1$ при пуске до $s = 0$ в режиме идеального холостого хода.

При вращении ротора со скоростью $\omega_2 > \omega_1$ в направлении вращения магнитного поля скольжение становится отрицательным. Машина переходит в генераторный режим и развивает тормозной момент. При вращении ротора в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля ($s > 1$), асинхронная машина переходит в режим противовключения и также развивает тормозной момент. Таким образом, в зависимости от скольжения различают **двигательный** ($s = 1 \div 0$), **генераторный** ($s = 0 \div -\infty$) **режимы** и **режим противовключения** ($s = 1 \div +\infty$). Режимы генераторный и противовключения используют для торможения асинхронных двигателей.

В современных АД, в зависимости от их типа, при номинальной нагрузке скольжение составляет $s_{\text{ном}} = 0,015\text{--}0,07$.

11.1.3 Схемы соединений обмоток статора. Начала фазных обмоток обозначаются C_1, C_2, C_3 ; концы - C_4, C_5, C_6 . Для включения двигателя в сеть обмотки статора соединяются в звезду или треугольник. Вопрос о схеме соединения решается в зависимости от линейного напряжения сети и номинального фазного напряжения обмоток статора. Указания об этом приводятся в паспорте двигателя. При схеме соединения в звезду (см. рис. 11.4, а) все три конца фазных обмоток C_4, C_5, C_6 соединяются в нулевую точку. При схеме соединения в треугольник (см. рис. 11.4, б) соединяются между собой попарно начала и концы соседних фаз: $C_1 - C_6$, $C_2 - C_4$, $C_3 - C_5$. Сеть присоединяется в первом случае к трем началам C_1, C_2, C_3 , во втором - к общим точкам $C_1-C_6, C_2-C_4, C_3-C_5$.

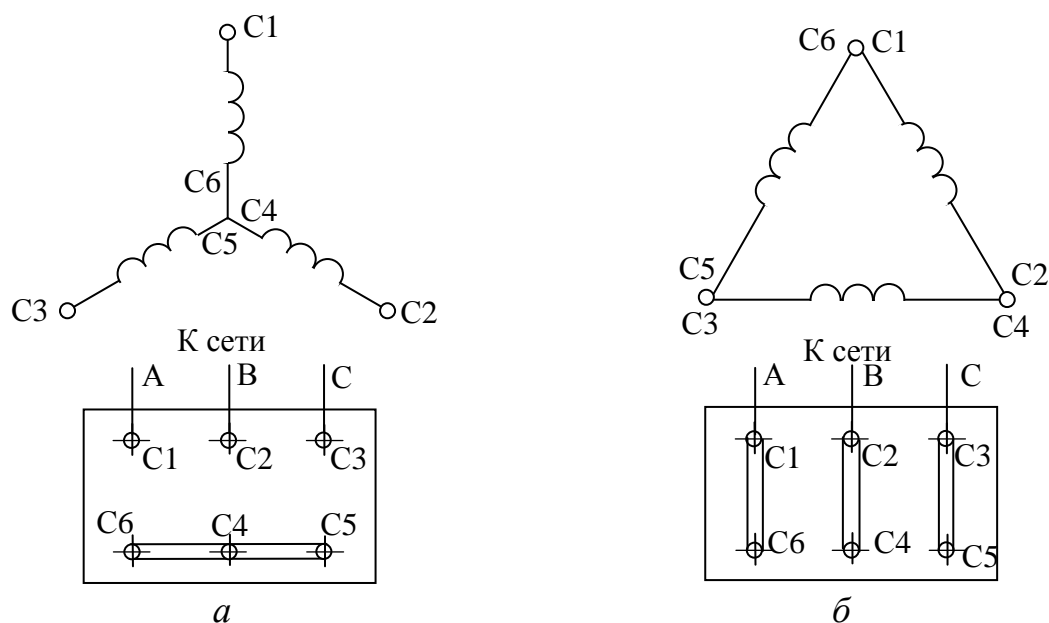


Рисунок 11.4 – Схемы соединения фазных обмоток АД:
а – звезда; б – треугольник

Понятия «начало» и «конец» фазных обмоток условны, однако они необходимы для правильного соединения обмоток в схеме. Для одной из фазных обмоток можно произвольно выбрать ее начало (C_1), но после этого для двух других за начала следует принимать такие их выводы, идя от которых обмотки наматываются в том же, что и первая, направлениях. У собранного двигателя установить одноименность выводов практически невозможно. При отсутствии обозначения выводов статора их разметку выполняют с помощью измерений. Если две обмотки статора соединить последовательно, то возможны два варианта включения - согласное, когда соединены начало и конец (рис. 11.5, *а*), и встречное, когда обмотки соединены концами или началами (рис. 11.5, *б*). Результирующий магнитный поток обеих обмоток $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ будет по-разному ориентирован относительно третьей обмотки. В первом случае третья обмотка будет пронизываться суммарным потоком, который индуцирует в ней ЭДС. Вольтметр на ее зажимах покажет напряжение U_2 , равное примерно половине подведенного U_1 . Во втором случае суммарный поток замкнется в плоскости третьей обмотки, и вольтметр покажет нуль.

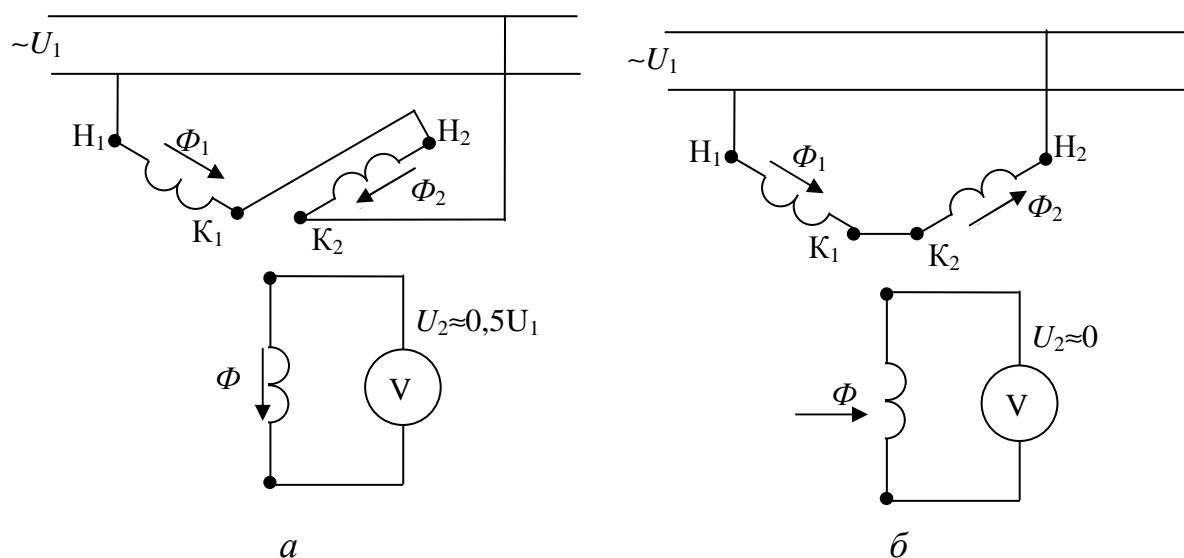


Рисунок 11.5 – Схема для определения начал и концов обмоток статора

Таким образом, по показаниям вольтметра устанавливают одноименные зажимы первых двух обмоток. После разметки одна из этих обмоток меняется местом с третьей, и опыт повторяют для определения одноименных зажимов третьей обмотки. При проведении опыта следует пользоваться пониженным напряжением ($U \approx 0,3 \cdot U_{\text{н}}$).

11.2 ЭДС статора и ротора

Вращающееся магнитное поле в каждой из обмоток статора и ротора индуцирует переменную ЭДС. За счет распределения каждой обмотки по пазам обеспечивается практически синусоидальная форма кривых ЭДС в обмотках, но в результате ЭДС отдельных секций обмотки имеют различ-

ные фазы, и их следует складывать как векторы. Поэтому общая ЭДС фазной обмотки меньше арифметической суммы ЭДС отдельных секций. Для учета этого обстоятельства в формулу ЭДС двигателя вводится обмоточный коэффициент k , который принимают меньшим или равным единице. Таким образом, ЭДС фазной обмотки статора определяется формулой

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi, \quad (11.2)$$

где f_1 – частота тока статора;

w_1 – число витков фазной обмотки;

k_1 – обмоточный коэффициент статора ($k_1 = 0,9–0,95$);

Φ – магнитный поток вращающегося поля.

Аналогичной формулой определяется ЭДС фазы ротора

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi, \quad (11.3)$$

где f_2 – частота тока ротора;

w_2 – число витков фазы ротора;

k_2 – обмоточный коэффициент ротора, в случае короткозамкнутого ротора $k_2 = 1$.

Магнитное поле, вращаясь в пространстве с синхронной скоростью n_1 , относительно вращающегося ротора имеет скорость

$$n_s = n_1 - n_2. \quad (11.4)$$

За каждый оборот поля относительного ротора фаза его ЭДС изменяется на $p \cdot 360$ электрических градусов, что соответствует p полным периодам ЭДС. Частота ЭДС ротора, т. е. количество периодов в секунду, при этом оказывается равной

$$f_2 = \frac{n_s \cdot p}{60} \quad \text{или} \quad f_2 = f_1 \cdot s, \quad (11.5)$$

т. е. частота ЭДС ротора, а следовательно, и величина ЭДС E_2 (11.3) пропорциональны скольжению. Наибольшей частота ЭДС ротора будет в начальный момент пуска, когда $s = 1$. При этом она равна частоте питающей сети f_1 . С разгоном двигателя убывает скольжение и уменьшается частота тока ротора. В рабочем режиме двигателя, питаемого током частотой $f_1 = 50$ Гц, частота тока ротора составляет 1–2 Гц. При $s = 1$, $f_2 = f_1$, тогда ЭДС неподвижного ротора имеет вид

$$E_{2H} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi. \quad (11.6)$$

Подставив E_{2H} в формулу (11.3), получим ЭДС вращающегося ротора:

$$E_2 = E_{2H} \cdot s. \quad (11.7)$$

Таким образом, ЭДС E_2 , как и ее частота, с разгоном ротора уменьшается. Отношение ЭДС статора E_1 (11.2) к ЭДС неподвижного ротора E_{2H} (11.6) называют **коэффициентом трансформации ЭДС асинхронного**

двигателя, который равен

$$k_e = \frac{E_1}{E_{2H}} = \frac{w_1 \cdot k_1}{w_2 \cdot k_2}. \quad (11.8)$$

ЭДС статора и ротора E_1 и E_2 создаются главным вращающимся потоком. Этот поток замыкается через воздушный зазор между статором и ротором. Помимо главного потока, *каждая из обмоток создает поток, сцепляющийся лишь с ней самой*. Этот поток называется *поток рассеяния*. Поток рассеяния замыкается через пазы, а также вокруг лобовых частей обмоток. Учитывая, что потоки рассеяния проходят в основном по воздуху, можно считать их пропорциональными токам в обмотках. Потоки рассеяния индуктируют в обмотках статора и ротора ЭДС рассеяния E_{p1} и E_{p2} . Эти ЭДС могут быть учтены как индуктивные падения напряжения в обмотках:

$$E_{p1} = -I_1 \cdot X_1 = -I_1 \cdot \omega_1 \cdot L_1; \quad (11.9)$$

$$E_{p2} = -I_2 \cdot X_2 = -I_2 \cdot \omega_2 \cdot L_2, \quad (11.10)$$

где I_1 и I_2 - токи статора и ротора;

X_1 и X_2 - индуктивные сопротивления статорной и роторной обмоток;

L_1 и L_2 - индуктивности рассеяния статора и ротора.

Так как мы исходим из пропорциональной зависимости между потоками рассеяния и токами, их создающими, то индуктивности рассеяния L_1 и L_2 являются величинами постоянными. Они зависят от конструктивных особенностей обмоток, формы пазов статора и ротора. Поскольку частота ротора не остается постоянной, а зависит от скольжения, зависимым от скольжения оказывается и индуктивное сопротивление ротора

$$X_2 = \omega_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot s,$$

или $X_2 = X_{2H} \cdot s, \quad (11.11)$

где $X_{2H} = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2$ - индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора (при $s = 1$).

11.3 Уравнения электрического равновесия статора и ротора

ЭДС каждой фазной обмотки статора уравновешивается приложенным напряжением сети U_1 . Кроме того, за счет напряжения сети покрывается падение напряжения в активном сопротивлении обмотки статора R_1 , создаваемое током статора I_1 и равное $I_1 \cdot R_1$. На основании этого можно записать уравнение напряжений или, иначе говоря, *уравнение электрического равновесия статора*:

$$\bar{U}_1 + \bar{E}_1 + \bar{E}_{p1} - \bar{I}_1 \cdot R_1 = 0,$$

или $\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 - \bar{E}_{p1} + \bar{I}_1 \cdot R_1. \quad (11.12)$

По фазе E_1 отстает от вращающегося потока на четверть периода или на угол 90° . ЭДС рассеяния E_{p1} отстает на угол 90° от тока I_1 . Активное падение напряжения $I_1 \cdot R_1$ совпадает с током по фазе.

Поскольку $E_{p1} = I_1 \cdot X_1$ то

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot R_1 + \bar{I}_1 \cdot X_1, \quad (11.13)$$

или
$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot Z_1, \quad (11.14)$$

где $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ – полное сопротивление фазы статора.

В комплексной форме уравнение электрического равновесия статора имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1. \quad (11.15)$$

Так как сопротивление фазных обмоток статора Z_1 обычно невелико, можно пренебречь падением напряжения $I_1 \cdot Z_1$, тогда

$$U_1 \approx E_1 \equiv \Phi. \quad (11.16)$$

Следовательно, при постоянном напряжении сети вращающийся магнитный поток является практически постоянным, не зависящим от нагрузки. Это явление имеет место для небольших значений токов статора.

Вращающийся магнитный поток индуцирует в фазах ротора ЭДС E_2 , которая вызывает ток I_2 . Ток ротора создает поток рассеяния, ЭДС рассеяния равна $E_{p2} = -I_2 \cdot X_2$, а падение напряжения в активном сопротивлении ротора равно $I_2 \cdot R_2$.

Таким образом, **уравнение электрического равновесия ротора** имеет вид

$$\bar{E}_2 + \bar{E}_{p2} = \bar{I}_2 \cdot R_2,$$

или
$$\bar{E}_2 = \bar{I}_2 \cdot R_2 + \bar{I}_2 \cdot X_2 = \bar{I}_2 \cdot Z_2, \quad (11.17)$$

где $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ – полное сопротивление фазы ротора.

В комплексной записи уравнение электрического равновесия ротора выглядит следующим образом:

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2. \quad (11.18)$$

Уравнению (11.18) соответствует векторная диаграмма ротора, изображенная на рисунке 11.6. Из уравнения напряжений ток ротора равен

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}. \quad (11.19)$$

Величины E_2 и X_2 зависят от скольжения. Учитывая, что $E_2 = E_{2H} \cdot s$ и $X_2 = X_{2H} \cdot s$, получим

$$I_2 = \frac{E_{2H} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 \cdot s^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2H}^2}}. \quad (11.20)$$

В этой формуле переменной, зависящей от нагрузки величиной, является скольжение s . Формула показывает, что ток ротора будет максимальным при максимальном скольжении, т. е. в начальный момент пуска двигателя, когда $s = 1$. С уменьшением скольжения ток ротора снижается.

Как правило, $R_2 < X_{2H}$, поэтому член R_2/s под корнем в знаменателе формулы тока оказывает существенное влияние на величину тока лишь при малых скольжениях.

Фаза тока относительно ЭДС E_2 также зависит от скольжения

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_{2H} \cdot s}{R_2}. \quad (11.21)$$

При малом скольжении угол ψ_2 небольшой. На основании (11.20) электрическую цепь ротора можно изобразить схемой, состоящей из активного R_2/s и индуктивного X_{2H} (вместо реальных R_2 и X_2) сопротивлений, к которой приложено напряжение U , равное ЭДС неподвижного ротора E_{2H} (рис. 11.7, а). Векторная диаграмма такой схемы ротора показана на рисунке 11.7, б.

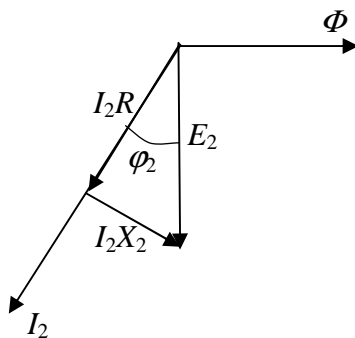


Рисунок 11.6 – Векторная диаграмма в соответствии с уравнением (11.18)

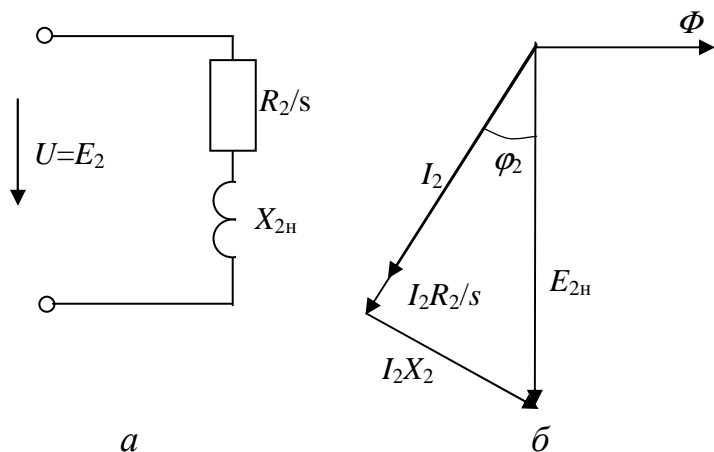


Рисунок 11.7 – Схема ротора (а) и векторная диаграмма (б) при малых скольжениях

11.4 Уравнения намагничивающих сил и токов

Вращающийся магнитный поток двигателя в рабочем режиме создается совместным действием намагничивающих сил статора и ротора, которые зависят от числа фаз, числа витков, величины токов в обмотках, а также от распределения обмоток по пазам.

Намагничивающая сила статора пропорциональна $m_1 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot k_1$, а ротора – $m_2 \cdot I_2 \cdot w_2 \cdot k_2$, где m_1 - число фаз статора, m_2 - число фаз ротора, k_1, k_2 - поправочные коэффициенты.

Намагничивающая сила статора вращается в пространстве с синхронной скоростью, определяемой частотой питающего тока и числом пар полюсов, $n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$. Ток ротора имеет частоту f_2 . Его намагничивающая сила вращается относительно ротора со скоростью $n_s = \frac{f_2 \cdot 60}{p}$.

Сам же ротор вращается в пространстве со скоростью n_2 . Следовательно, намагничивающая сила ротора в пространстве вращается со скоростью $n_2 + n_s = n_1$, т. е. с синхронной скоростью.

Таким образом, намагничивающие силы статора и ротора в пространстве вращаются с одинаковой, синхронной скоростью. По отношению друг к другу они оказываются неподвижны. Это обстоятельство позволяет складывать их геометрически независимо от того, неподвижен ротор или вращается. Геометрическая сумма намагничивающих сил статора и ротора определяет результирующую намагничивающую силу, которая создает вращающийся поток в рабочем режиме. Она равна

$$m_1 \cdot \dot{I}_0 \cdot w_1 \cdot k_1 = m_1 \cdot \dot{I}_1 \cdot w_1 \cdot k_1 + m_2 \cdot \dot{I}_2 \cdot w_2 \cdot k_2. \quad (11.22)$$

Это уравнение называется *уравнением намагничивающих сил асинхронного двигателя*.

На основании уравнения намагничивающих сил двигателя ток статора можно разделить на две составляющие

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}. \\ \text{Обозначив} \quad I_2 \frac{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1} &= I_2 \cdot \frac{1}{k_i} = I_2', \end{aligned} \quad (11.23)$$

получим

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'), \quad (11.24)$$

где I_0 – намагничивающий ток статора;

I_2' – приведенный ток ротора, т. е. часть тока статора, которая уравнивает размагничивающее действие тока ротора;

$k_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}$ – коэффициент трансформации токов АД.

Из уравнения (11.16) следует, что вращающийся магнитный поток в основном определяется напряжением сети. Следовательно, от напряжения зависит и намагничивающая составляющая тока статора I_0 . Если $U_1 = \text{const}$,

то и $I_0 \approx \text{const}$, т. е. можно считать, что ток I_0 практически не зависит от нагрузки двигателя. При изменении нагрузки на валу ток статора изменяется за счет его составляющей $-I_2'$. Электромагнитные явления, которыми сопровождается переход асинхронного двигателя от одной нагрузки к другой, протекают так же, как у трансформатора при изменении его вторичной нагрузки.

По уравнению (11.24) можно построить векторную диаграмму токов (рис. 11.8). Ее построение удобнее начинать с вектора вращающегося потока Φ . Ток I_0 вследствие потерь в магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис опережает поток Φ на угол потерь α . При заданном потоке ток I_0 и угол α устанавливаются по магнитным характеристикам магнитопровода. Величину и фазу $-\dot{I}_2$ можно определить по величине и фазе тока ротора \dot{I}_2 с помощью выражений (11.20), (11.21), (11.23). Сумма $\dot{I}_0 + (-\dot{I}_2)$ дает ток статора \dot{I}_1 . Доля намагничивающего тока $-I_2'$ в токе статора АД по сравнению с долей тока холостого хода трансформатора в первичном токе значительно больше, поскольку магнитопровод двигателя имеет воздушный зазор.

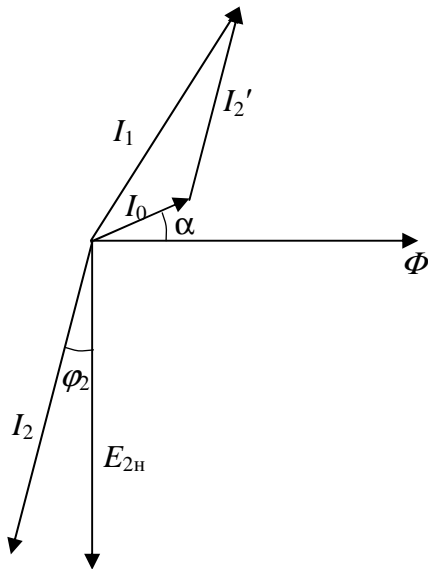


Рисунок 11.8 – Векторная диаграмма токов

11.5 Схема замещения асинхронного двигателя

Преобразуем уравнение напряжений ротора (11.18), разделив обе его части на скольжение:

$$\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} + \dot{I}_2 \cdot j \frac{X_2}{s}. \quad (11.25)$$

Учитывая, что $\frac{\dot{E}_2}{s} = \dot{E}_{2H}$, а $\frac{X_2}{s} = X_{2H}$, можно записать

$$\dot{E}_{2H} = \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} + \dot{I}_2 \cdot j X_{2H}. \quad (11.26)$$

Принимая во внимание, что $I_2 = I_2' k_i$, где I_2' – приведенный ток ротора, т. е. часть тока статора, которая уравновешивает размагничивающее действие тока ротора; $k_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_2}$ – коэффициент трансформации токов асинхронного двигателя, умножив (11.26) на коэффициент трансформации

ЭДС k_e (11.8), получим

$$\dot{E}_{2H} \cdot k_e = \dot{I}_2 \frac{R_2 \cdot k_e \cdot k_i}{s} + \dot{I}_2 \cdot jx_{2H} \cdot k_e \cdot k_i,$$

или

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' \frac{R_2'}{s} + \dot{I}_2' \cdot jX_{2H}', \quad (11.27)$$

где $E_2' = E_{2H} \cdot k_e$ – приведенная к статору ЭДС неподвижного ротора, она равна ЭДС статора E_1 ;

$R_2' = R_2 \cdot k = R_2 \cdot k_e \cdot k_i$ – приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора;

$X_{2H}' = X_{2H} \cdot k = X_{2H} \cdot k_e \cdot k_i$ – приведенное индуктивное сопротивление неподвижного ротора;

$k = k_e \cdot k_i = \frac{m_1 \cdot w_1^2 \cdot k_1^2 \cdot k^2}{m_2 \cdot w_2^2 \cdot k^2}$ – коэффициент приведения сопротивлений ротора к статору.

Такая замена действительных величин ротора приведенными не изменяет энергетических соотношений в нем, но позволяет перейти от электромагнитной связи между цепями ротора и статора к электрической связи между ними.

На основании уравнений напряжений статора (11.14) и ротора (11.27) и уравнения токов (11.24) **АД может быть представлен электрической схемой замещения**, приведенной на рисунке 11.9.

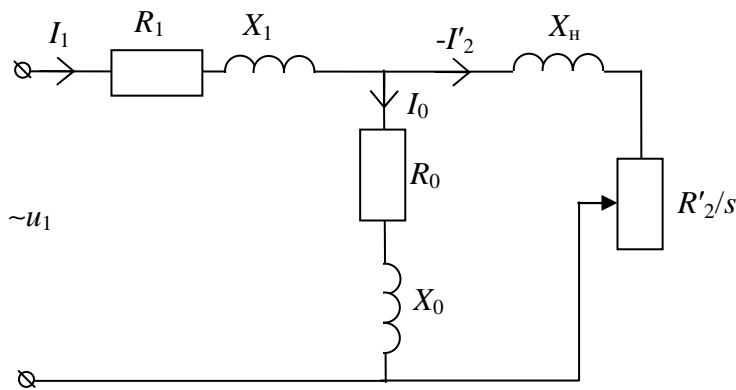


Рисунок 11.9 – Схема замещения АД

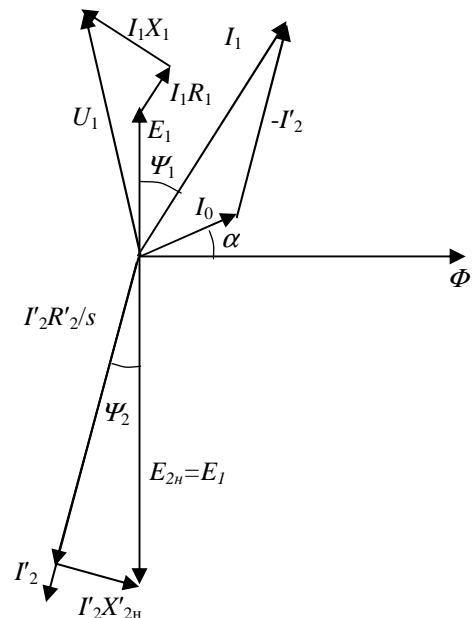


Рисунок 11.10 – Полная векторная диаграмма АД

Данной схеме замещения соответствует полная векторная диаграмма асинхронного двигателя, которая изображена на рисунке 11.10. И схема замещения, и векторная диаграмма удовлетворяют указанным уравнениям напряжений и токов. Ветвь схемы с током I_0 называется ветвью намагни-

чивания. Сопротивления R_0 и X_0 определяются магнитными свойствами магнитопровода. Падение напряжения, вызываемое током I_0 , равно и противоположно по фазе ЭДС статора E_1 и приведенной ЭДС ротора E'_2 :

$$\dot{I}_0 \cdot R_0 + \dot{I}_0 \cdot jX_0 = -\dot{E}_1 = -\dot{E}'_2. \quad (11.28)$$

Параметры схемы замещения могут быть установлены путем расчетам или на основании опытных данных. Для АД, как и для трансформаторов, проводят опыты холостого хода и короткого замыкания.

11.6 Потери и КПД асинхронного электродвигателя

В АД электрическая энергия преобразуется в механическую. В процессе такого преобразования часть ее теряется в самом двигателе. Мощность P_1 , потребляемая обмоткой статора от сети, расходуется на потери в статоре и потери в роторе электродвигателя.

Потери в статоре складываются из мощности потерь в сердечнике статора на гистерезис и вихревые токи (потери в стали статора) P_c и мощности электрических потерь в обмотке статора $P_{\Sigma.c}$ на ее нагрев током

$$P_{\Sigma.c} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1, \quad (11.29)$$

где m_1 – число фаз статора;

I_1 – ток статора;

R_1 – активное сопротивление фазы статора.

Оставшаяся часть $P_{\Sigma.m}$ называется электромагнитной мощностью двигателя. Она является электромагнитной мощностью вращающегося поля. Некоторая ее часть расходуется на электрические потери в роторе $P_{\Sigma.p}$:

$$P_{\Sigma.p} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (11.30)$$

где I_2 – ток ротора;

R_2 – активное сопротивление фазы ротора;

m_2 – число фаз ротора.

У двигателей с контактными кольцами $m_2 = m_1$. У короткозамкнутых двигателей ротор является многофазным. Число его фаз равно числу стержней клетки, приходящихся на одну пару полюсов. Если число пазов ротора Z_2 , то число фаз $m_2 = Z_2/p$. Потерями в стали ротора вследствие малой частоты тока ротора можно пренебречь. Оставшаяся часть электромагнитной мощности преобразуется в механическую P'_2 . Если из нее вычесть мощность механических потерь P_m , обусловленных трением в подшипниках и о воздух, и мощность добавочных потерь P_d , связанных с пульсациями магнитного потока в зубцовой зоне магнитопровода и с полями рассеяния, то получим механическую мощность на валу P_2 . Тогда КПД двигателя составляет

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (11.31)$$

где ΔP – суммарные потери в двигателе.

Некоторые из потерь (например, потери в стали) практически не зависят от нагрузки; другие (например, электрические потери в обмотках статора и ротора) – связаны с нагрузкой. В целом с ростом нагрузки возрастают потери, а следовательно, и нагрев двигателя. Предельная механическая мощность на валу, которую двигатель может развивать длительно (неограниченно долго), не перегреваясь свыше допустимой температуры, **называется номинальной мощностью двигателя**. Она указывается в его паспорте. КПД двигателя при номинальной нагрузке в значительной мере зависит от номинальной мощности двигателя. Чем больше мощность двигателя, тем меньше относительные потери в нем и больше КПД. Для крупных асинхронных двигателей номинальный КПД весьма высок и достигает значений 0,9–0,97, в то время как для двигателей малых мощностей (около 1 кВт) он равен лишь 0,7–0,8. Кроме того, при прочих равных условиях номинальный КПД выше у двигателя с большей синхронной скоростью.

Электромагнитная мощность двигателя $P_{\text{ЭМ}}$ может быть представлена произведением момента электромагнитных сил и угловой скорости поля

$$P_{\text{ЭМ}} = M \cdot \omega_1 = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60}. \quad (11.32)$$

В свою очередь, механическая мощность ротора P_2' равна произведению момента на угловую скорость ротора

$$P_2' = M \cdot \omega_2 = M \frac{2\pi \cdot n_2}{60}. \quad (11.33)$$

Электромагнитная мощность ротора:

$$P_{\text{Э.Р}} = P_{\text{ЭМ}} - P_2' = M \frac{2\pi}{60} (n_1 - n_2) = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = M \cdot \omega_1 \cdot s = P_{\text{ЭМ}} \cdot s. \quad (11.34)$$

При пуске двигателя, когда $s = 1$, электромагнитная мощность $P_{\text{ЭМ}}$ равна мощности потерь в роторе $P_{\text{Э.Р}}$. По мере разгона двигателя потери в роторе убывают.

Таким образом, скольжение s является мерой потерь в роторе.

В нормальном режиме работы двигателя малое значение s , порядка нескольких процентов, является важным условием его экономичности.

11.7 Вращающий момент асинхронного двигателя

Выразим вращающий момент через потери в роторе и скольжение

$$M = \frac{P_{\text{Э.Р}}}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot s}. \quad (11.35)$$

В соответствии с векторной диаграммой (рис. 11.6) $I_2 \cdot R_2 = E_2 \cdot \cos \psi_2$, а в соответствии с формулами (11.6) и (11.7) ЭДС ротора равна

$$E_2 = E_{2H} \cdot s = 4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi \cdot s. \quad (11.36)$$

Подставляя (11.36) в формулу момента, получим

$$M = \frac{4,44 \cdot m_2 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2}{\omega_1} \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2, \quad (11.37)$$

где $C = \frac{4,44 m_2 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2}{\omega_1}$ – постоянная величина для данного двигателя.

Таким образом, вращающий момент пропорционален произведению потока, тока ротора и косинуса угла сдвига фаз между током и ЭДС ротора.

Величины Φ , I_2 и $\cos \psi_2$ в большей или меньшей степени зависят от скольжения, что обуславливает зависимость от скольжения вращающего момента. Для выяснения этой зависимости преобразуем исходное выражение момента (11.35), используя формулы (11.8) и (11.20), получим:

$$M = \frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot s} \cdot \frac{E_{2H}^2 \cdot s^2 \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2} = \frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} \cdot \frac{E_1^2 \cdot s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}.$$

Обозначив постоянную величину $\frac{m_2}{\omega_1 \cdot k_e^2} = C_1$ имеем

$$M = C_1 \cdot E_1^2 \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}. \quad (11.38)$$

Если пренебречь падением напряжения в обмотке статора $I_1 \cdot Z_1$, то можно ЭДС E_1 заменить напряжением U_1 (11.16). Это допущение возможно только в известных пределах. При больших нагрузках и скольжениях падение напряжения в обмотке статора сильно возрастает, и разница между напряжением и ЭДС может оказаться существенной. С учетом сказанного формула момента принимает вид

$$M = C_1 \cdot U_1^2 \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}. \quad (11.39)$$

При $U_1 = \text{const}$, что обычно имеет место в нормальном режиме эксплуатации двигателя, вращающий момент является функцией скольжения, график которой изображается кривой 1 (рис. 11.11).

Из формулы (11.39) и графика следует, что при малых скольжениях ($s < s_K$) момент приближенно пропорционален скольжению. С увеличением скольжения становится ощутимее влияние s в знаменателе формулы (11.39), и момент, достигнув своего наибольшего значения M_K при скольжении $s = s_K$, далее убывает до величины пускового момента M_{Π} при $s = 1$. **Максимальный момент M_K и скольжение s_K , при котором он развивается, называются критическими.**

Двигатель работает с установившейся, т. е. неизменной, скоростью вращения при равновесии вращающего момента и момента сопротивления. Характер кривой момента сопротивления M_C в зависимости от скольжения (или скорости) определяется свойствами рабочего механизма. Если $M_C=F(s)$ имеет вид кривой 2 (см. рис. 11.11), то условие равновесия момен-

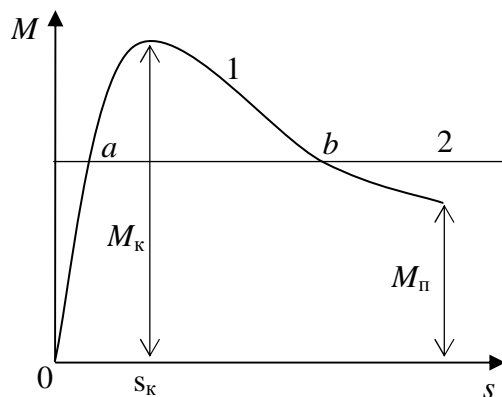


Рисунок 11.11 – Механическая характеристика АД

тов соблюдается при двух различных скольжениях - точка a , которой соответствует небольшое скольжение $s < s_K$, и точка b при скольжении $s > s_K$. Однако для устойчивой работы двигателя недостаточно простого равновесия моментов. Необходимо, чтобы двигатель был в состоянии восстановить равновесие при возможных его нарушениях. Это возможно, только при условии

$$\frac{dM}{ds} > \frac{dM_c}{ds}. \quad (11.40)$$

Как видно из рисунка 11.11, неравенство (11.40) имеет место только в области $s < s_K$ (точка a), т. е. на левой части кривой $M=F(s)$.

Поэтому асинхронный двигатель работает устойчиво лишь при скольжениях, меньших критического. Правая часть кривой $M = F(s)$, относящаяся к области скольжений $s > s_K$, называется неустойчивой. При таких скольжениях двигатель работать не может. Это обусловлено тем, что при работе со скольжением, соответствующим точке b , любое случайное нарушение равновесия моментов в ту или другую сторону вызывает разгон двигателя до скольжений $s < s_K$ (переход в точку a) или его остановку.

Вращающий момент в режиме номинальной нагрузки, соответствующий допустимому нагреву двигателя, должен быть с определенным запасом меньше критического M_K . Когда момент сопротивления нагрузки достигает величины критического момента, двигатель переходит на неустойчивую часть характеристики $M = F(s)$ и останавливается. Происходит «опрокидывание» двигателя. Чем больше превышение критического момента над номинальным, тем большие кратковременные перегрузки способен преодолевать двигатель. Перегрузочную способность двигателя принято характеризовать *коэффициентом перегрузочной способности* k_m , который равен

$$k_m = \frac{M_K}{M_H}, \quad (11.41)$$

где M_H – номинальный момент двигателя.

Для АД обычно $k_m = 1,6-2,5$. При оценке пусковых свойств двигателя важное значение имеет величина начального пускового момента M_H при $s = 1$.

Для определения критического скольжения следует приравнять нулю производную $\frac{dM}{ds}$ и решить полученное выражение относительно s . Такой анализ показывает, что

$$s_k = \frac{R_2}{X_{2H}}, \quad (11.42)$$

а сам критический момент, который можно получить из выражения (11.39) после подстановки значения $s = s_k$, равен

$$M_K = C_1 \cdot U_1^2 \frac{1}{2X_{2H}}. \quad (11.43)$$

Отсюда следует, что, во-первых, критический момент, а следовательно, и перегрузочная способность асинхронного двигателя зависит от квадрата напряжения. Это обуславливает высокую чувствительность асинхронных двигателей к отклонениям напряжения сети. Даже при сравнительно небольших снижениях напряжения резко уменьшается перегрузочная способность, что может вызывать остановку («опрокидывание») двигателя.

Во-вторых, величина M_K не зависит от активного сопротивления ротора R_2 , но от R_2 зависит скольжение s_k . У двигателей с контактными кольцами за счет добавочного активного сопротивления, вводимого в цепь ротора, оказывается возможным получить ряд кривых $M = F(s)$. При этом применение пускового реостата увеличивает пусковой момент M_n (см. подраздел 11.9).

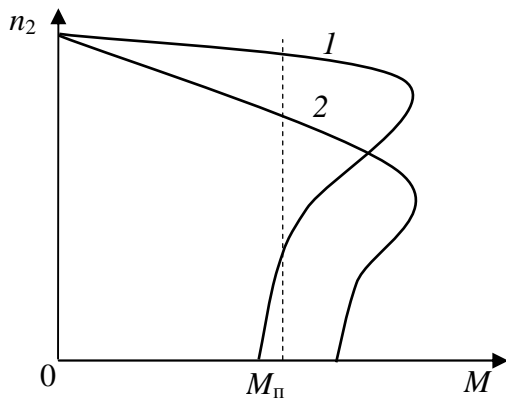


Рисунок 11.12 – Механические характеристики АД

Зависимость $M = F(s)$ определяет также связь между скоростью вращения и моментом. График $M=P(s)$ представляет собой видоизмененную, т. е. построенную в других координатах, **механическую характеристику**. В обычных координатах $n = P(M)$ она имеет вид показанный на рисунке 11.12. Кривая 1 – для двигателя короткозамкнутого и двигателя с контактными кольцами без добавочного сопротивления в цепи ротора; кривая 2 – для двигателя с контактными кольцами при введенном в цепь ротора добавочном активном сопротивлении.

Преобразуем (11.39), подставив вместо U_1 его значение из (11.43):

$$M = \frac{C_1 \cdot 2M_K \cdot X_{2H} \cdot R_2 \cdot s}{C_1(R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2)} = \frac{2M_K}{\frac{R_2}{X_{2H} \cdot s} + \frac{X_{2H} \cdot s}{R_2}}. \quad (11.44)$$

Учитывая (11.42), получим

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}}. \quad (11.45)$$

Эта простая формула удобна для расчета механической характеристики двигателя по двум известным величинам - M_K и s_K , которые можно получить из каталога.

11.8 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Под рабочими характеристиками АД понимают зависимости ряда величин, определяющих те или иные свойства двигателя, от полезной мощности P_2 , развиваемой на валу двигателя при постоянном приложенном напряжении сети. К таким величинам относятся скорость вращения n_2 или скольжение s , вращающий момент M , коэффициент мощности $\cos\varphi$, КПД и ток статора I_1 .

Примерные графики указанных зависимостей для двигателя нормального исполнения изображены на рисунке 11.13. Кратко поясним их.

Зависимость $n_2 = f(P_2)$ или $s = f(P_2)$ называется **скоростной характеристикой**.

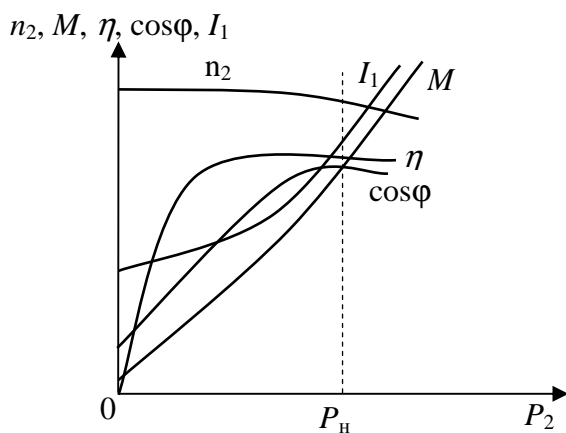


Рисунок 11.13 – Рабочие характеристики АД

При холостом ходе ($P_2 = 0$) скорость вращения n_2 близка к синхронной n_1 (скольжение близко к нулю). С увеличением нагрузки скорость вращения уменьшается, скольжение растет в соответствии с отношением $s = \frac{P_{E.P}}{P_{EM}}$ (см. 11.34). Из

соображений обеспечения высокого КПД это отношение ограничивается узкими пределами. Обычно при $P_2 = P_n$ скольжение $s = 1,54\text{--}5\%$. Соответственно $n_2 = f(P_2)$ представляет собой слабо наклонную к оси абсцисс кривую.

Моментная характеристика $M = f(P_2)$. Поскольку скорость вращения двигателя в рабочем диапазоне нагрузок изменяется очень незначительно, зависимость $M = f(P_2)$ оказывается весьма близкой к линейной.

Зависимость $\cos\varphi = f(P_2)$. Вследствие наличия в магнитной цепи двигателя воздушного зазора ток статора содержит сравнительно большую реактивную составляющую. Это влияет на коэффициент мощности. Поэтому $\cos\varphi$ АД всегда меньше единицы. Наибольшее его значение (0,8–0,9) имеет место при номинальной нагрузке. С уменьшением нагрузки он резко убы-

вает, достигая при холостом ходе значений 0,15–0,2. Недогруженный асинхронный двигатель имеет низкий коэффициент мощности.

Зависимость $\eta = f(P_2)$. КПД асинхронного двигателя имеет максимальное значение при номинальной или близкой к ней нагрузке ($P_2 \approx P_H$). При этом он достаточно высок.

Важно отметить, что при нагрузках $P_2 = (0,25–1,25)P_H$ изменения КПД незначительны. Это означает, что в довольно большом диапазоне нагрузок двигатель работает экономично с КПД, близким к максимальному.

Зависимость $I_1 = f(P_2)$. Согласно формуле (11.24), ток статора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2)$$

состоит из значительной намагничивающей составляющей I_0 , которая почти не зависит от нагрузки, и составляющей $-I_2$, уравнивающей нагрузку ротора. Главным образом за счет I_0 асинхронный двигатель при отсутствии нагрузки потребляет сравнительно большой ток холостого хода $I_{х.х.}$. Он может составлять более 50% номинального. С ростом нагрузки ток статора возрастает.

Кроме перечисленных, к рабочим характеристикам относят также перегрузочную способность двигателя и его механическую характеристику.

11.9 Пуск асинхронных двигателей

Под пуском понимают подачу переменного напряжения на зажимы АД и его последующий разгон до скорости, определяемой частотой питающего напряжения и моментом сопротивления на валу.

В начальный момент пуска ротор АД неподвижен и в его обмотке индуктируется ЭДС максимальной величины, частота которой равна частоте питающего напряжения. Скольжение ротора в этот момент времени $s = 1$, и ток ротора достигает наибольшего значения. Потребляемый двигателем ток при $s = 1$ называется пусковым током I_{Π} . Кратность пускового тока по отношению к номинальному току I_H велика и обычно составляет $k_{\Pi} = 5–7$. Кратность приводится в справочниках на асинхронные двигатели.

В зависимости от типа двигателя, его мощности, сопротивления нагрузки исполнительного механизма используются различные способы пуска АД.

11.9.1 Пуск АД с короткозамкнутым ротором. Пуск АД путем непосредственного подключения в сеть переменного тока без ограничения токов называют **прямым пуском**. Потери в обмотках АД пропорциональны квадрату тока, и поэтому длительность прямого пуска ограничивается во избежание перегрева обмоток и выхода из строя двигателя.

Прямой пуск применяют для двигателей с короткозамкнутым ротором, используемых для привода механизмов с небольшим моментом инер-

ции, время разгона которых до установившейся скорости сравнительно невелико. Схема прямого пуска АД (рис. 11.14) весьма проста, что способствовало ее широкому распространению. Для прямого пуска необходимо, чтобы вращающий момент АД превышал момент сопротивления механизма.

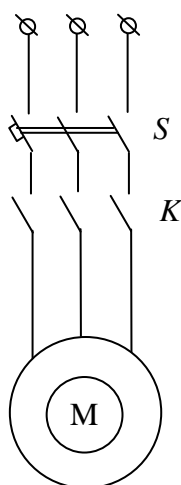


Рисунок 11.14 – Схема прямого пуска АД

Пуск двигателей механизмов с большим моментом инерции осуществляется либо подачей пониженного напряжения на АД, либо введением в цепь статора токоограничивающих сопротивлений. При пуске по схеме с токоограничивающими сопротивлениями (рис. 11.15) сначала включается контактор *K*, и разгон двигателя осуществляется с включенными в цепь обмотки статора активными (рис. 11.15, а) либо реактивными (рис. 11.15, б) сопротивлениями. Затем с выдержкой времени

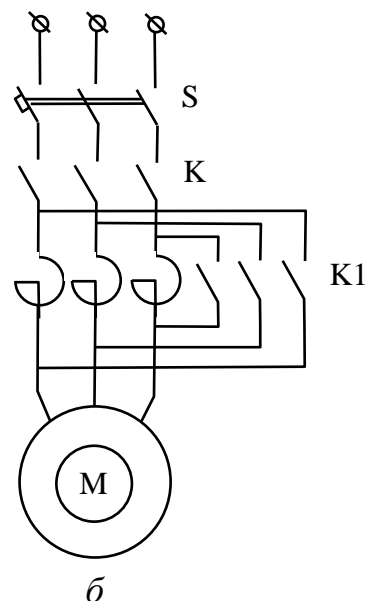
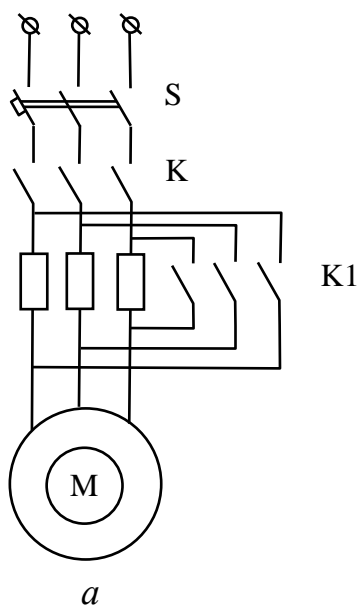


Рисунок 11.15 – Схема пуска асинхронного двигателя:
а – с активными сопротивлениями в цепи статора;
б – с реактивными сопротивлениями в цепи статора

включается контактор *K1* и своими контактами шунтирует токоограничивающие сопротивления в цепи обмотки статора. Пуск по схеме (рис. 11.15, б) называется реакторным.

11.9.2 Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором. Основным достоинством этих двигателей является возможность введения добавочных сопротивлений в цепь ротора и, следовательно, ограничения тока ротора в период пуска.

На рисунке 11.16, *а* показана схема реостатного пуска с введением в цепь ротора резисторов. В этом случае пуск АД чаще всего производится в функции времени. Для включения двигателя командоконтроллер (цепи управления на схеме не показаны) ставится в исходное положение, при котором контакты $1KY-3KY$ разомкнуты, и в цепь ротора полностью введены сопротивления R_1 , R_2 и R_3 . После пуска двигателя (замыкания силовых контактов пускателя \mathcal{L}) с выдержкой времени t_1 замыкаются контакты контактора ускорения $1KY$, которые шунтируют первую ступень сопротивлений R_1-R_3 . Далее с выдержкой времени t_2 замыкаются контакты контактора ускорения $2KY$, которые шунтируют вторую ступень сопротивлений R_1-R_3 . И, с выдержкой времени t_3 , шунтируется третья ступень сопротивлений R_1-R_3 .

Включение активных сопротивлений в ротор АД приводит к увеличению критического скольжения:

$$s_k = \frac{c_1(R_2' + R_{2Д}')}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X_{2\sigma}')^2}}, \quad (11.46)$$

где $R_{2Д}$ – добавочное активное сопротивление в цепи ротора, приведенное к обмотке статора АД.

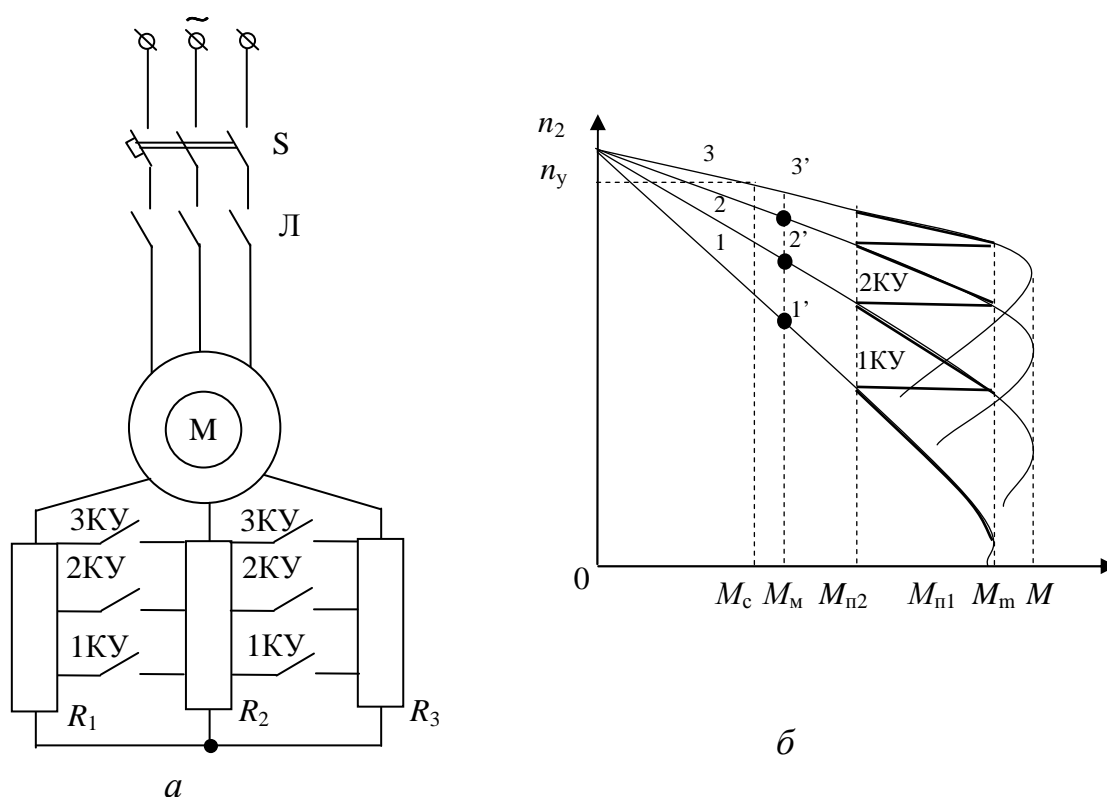


Рисунок 11.16 – Схема (*а*) и пусковая диаграмма (*б*) реостатного пуска коллекторного АД

Увеличение s_k , в свою очередь, увеличивает наклон механических характеристик (рис. 11.16, б). Критический момент АД не зависит от активного сопротивления роторной цепи, его величина, несмотря на включение $R'_{2д}$, сохраняется неизменной. Схему управления реостатным пуском выполняют таким образом, чтобы моменты переключения $M_{п1}$ и $M_{п2}$ для всех ступеней пуска были одинаковыми.

На рисунке 11.16, б пусковым механическим характеристикам 1, 2, 3 соответствуют добавочные активные сопротивления $R_{2д1} > R_{2д2} > R_{2д3}$. После включения АД работает на характеристике 1. В точке 1У включается контактор 1У и АД переходит на характеристику 2, а в точке 2У происходит его переход на характеристику 3. После шунтирования добавочных резисторов в точке 3У АД переходит на естественную характеристику и достигает установившейся скорости n_y , определяемой моментом сопротивления M_c . Значение момента переключения $M_{п2}$ определяется величинами выдержки реле времени цепей управления, которые настраиваются на требуемые значения.

На практике применяются и другие схемы пуска АД [29].

11.10 Механические характеристики асинхронного двигателя в тормозных режимах

В подразделе 11.7 были рассмотрены механические характеристики АМ, работающей в двигательном режиме. Однако АД может работать и в тормозных режимах: при торможении с отдачей энергии в сеть, при торможении противовключением и при динамическом торможении.

Торможение с отдачей энергии в сеть (генераторный режим работы параллельно с сетью) возможно при скорости, превышающей синхронную. Механические характеристики асинхронного двигателя в координатах M и ω представлены на рисунке 11.17. В квадранте I расположены участки характеристик двигательного режима для трех различных сопротивлений роторной цепи. По мере приближения скорости двигателя к скорости идеального холостого хода, или синхронной скорости, момент двигателя приближается к нулю.

При дальнейшем увеличении угловой скорости под влиянием внешнего момента, когда $\omega = \omega_0$, двигатель работает в режиме генератора параллельно с сетью, которой он может отдавать электрическую энергию, потребляя при этом реактивную мощность для возбуждения. Торможению с отдачей энергии в сеть отвечают участки характеристик, расположенные в верхней части квадранта II. В этом режиме максимальный момент имеет большее значение, чем в двигательном. Режим торможения с отдачей энергии в сеть применяется практически для двигателей с переключением полюсов, а также для приводов подъемно-транспортных машин (подъемники, экскаваторы и т. п.) и в некоторых других случаях.

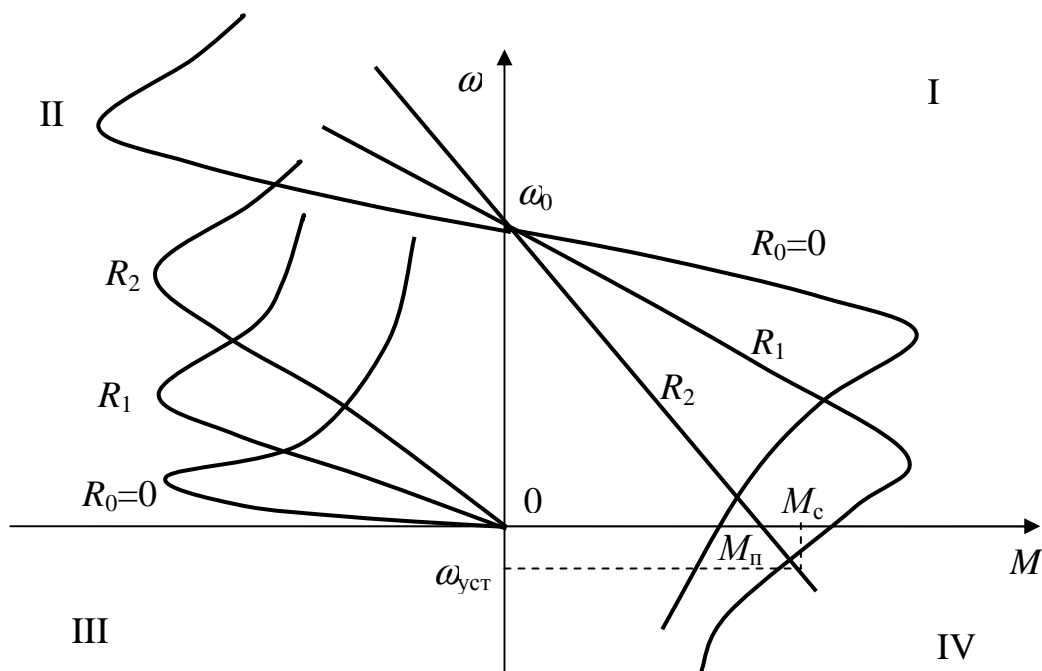


Рисунок 11.17 – Механические характеристики АД в различных режимах работы

Торможение противовключением значительно чаще применяется на практике. Режим торможения противовключением может быть получен так же, как и для двигателя постоянного тока, при движущем моменте нагрузки $M_c > M_n$ (рис. 11.17). Для ограничения тока и получения соответствующего момента необходимо при использовании двигателя с фазным ротором в его роторную цепь включить дополнительное сопротивление. Установившемуся режиму при торможении противовключением соответствует, например, точка $\omega_{уст}$, M_c на характеристике R_2 (рис. 11.17).

Механическая характеристика для R_1 в режиме торможения противовключением и $M_c = \text{const}$ не обеспечивает устойчивой работы. Торможение противовключением может быть получено также путем переключения на ходу двух фаз обмотки статора, что ведет к изменению направления вращения магнитного поля (переход из точки А в точку В на рисунке 11.18). Ротор при этом вращается против направления движения поля и постепенно замедляется. Когда угловая скорость спадет до нуля (точка С на рисунке 11.18), двигатель нужно отключить от сети, иначе он может вновь перейти в двигательный режим, причем ротор его будет вращаться в направлении, обратном предыдущему (точка D).

Динамическое торможение асинхронного двигателя осуществляется обычно включением обмотки статора в сеть постоянного тока; обмотка ротора при этом замыкается на внешние сопротивления. Для перехода из двигательного режима в режим динамического торможения контактор К1 (рис. 11.19) отключает статор от сети переменного тока, а контактор К2 присоединяет обмотку статора к сети постоянного тока. Для ограничения

тока и получения различных тормозных характеристик в цепи ротора предусмотрены внешние сопротивления.

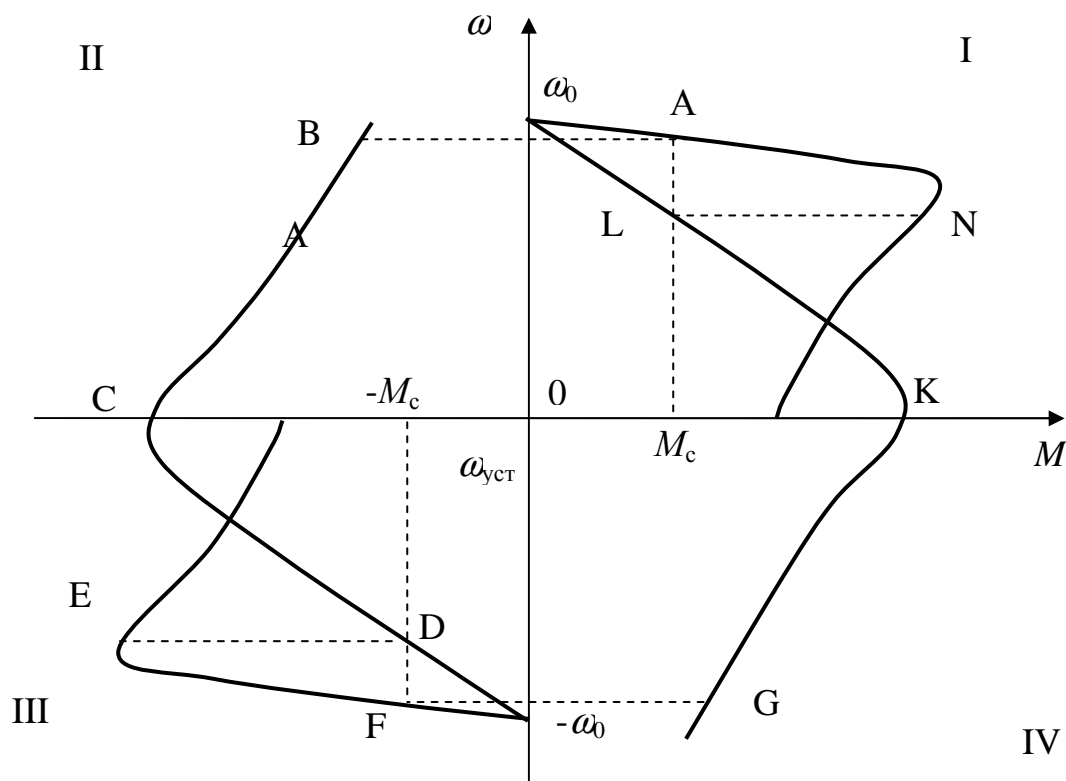


Рисунок 11.18 – Механические характеристики АД при переключении двух фаз статора

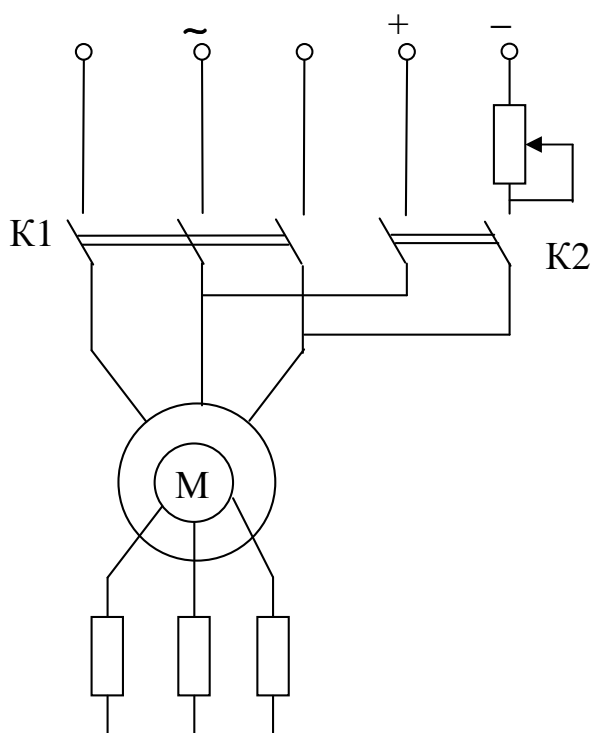


Рисунок 11.19 – Схема включения АД для перехода на режим динамического торможения

Протекая по обмотке статора, постоянный ток образует неподвижное поле, основная волна которого дает синусоидальное распределение индукции. Во вращающемся роторе возникает переменный ток, создающий свое поле, которое также неподвижно относительно статора. В результате взаимодействия суммарного магнитного потока с током ротора возникает тормозной момент, который зависит от МДС статора, сопротивления ротора и угловой скорости двигателя. Механические характеристики для этого режима приведены в нижней части квадранта II (см. рис. 11.17). Они проходят через начало координат, так

как при угловой скорости, равной нулю, тормозной момент в этом режиме также равен нулю. Максимальный момент пропорционален квадрату приложенного к статору напряжения и возрастает с ростом напряжения. Критическое скольжение зависит от сопротивления роторной цепи. Оно увеличивается пропорционально росту сопротивления. Максимальный момент при этом не изменяется.

На рисунке 11.17 характеристики динамического торможения даны для трех различных сопротивлений цепи ротора и одном и том же токе статора.

Иногда применяют торможение с самовозбуждением, подключая к статору конденсаторную батарею. В этом случае машина работает асинхронным генератором, получая намагничивающий ток от конденсаторов. Возбуждаясь со стороны статора, машина при определенной угловой скорости генерирует энергию, выделяемую в виде теплоты в роторной цепи. Подобные схемы торможения не нашли еще широкого применения вследствие высокой стоимости конденсаторов.

На практике применяют чаще всего торможение противовключением, особенно когда требуется осуществить изменение направления вращения (реверс), или динамическое торможение, когда реверс не требуется.

11.11 Однофазный асинхронный двигатель

Однофазный двигатель имеет одну обмотку, расположенную на статоре. Однофазная обмотка, питаемая переменным током, создает пульсирующее магнитное поле. Если поместить в это поле ротор с короткозамкнутой обмоткой, он вращаться не будет. Если же раскрутить ротор сторонней механической силой в любую сторону, двигатель будет устойчиво работать. Объяснить это можно следующим образом.

Пульсирующее магнитное поле можно заменить двумя магнитными полями, вращающимися в противоположных направлениях с синхронной частотой n_1 и имеющими амплитуды магнитных потоков, равные половине амплитуды магнитного потока пульсирующего поля. Одно из магнитных полей называется прямым, другое - обратным. Каждое из магнитных полей индуцирует в роторной обмотке вихревые токи. При взаимодействии вихревых токов с магнитными полями образуются вращающие моменты, направленные встречно друг другу.

На рисунке 11.20 изображены зависимости момента от прямого поля M' , момента от обратного поля M'' и результирующего момента $M = M' - M''$ в функции скольжения. Оси скольжений по отношению друг к другу направлены встречно. В пусковом режиме на ротор действуют вращающие моменты, одинаковые по величине и противоположные по направлению.

Если раскрутить ротор сторонней силой в направлении прямого магнитного поля, появится избыточный (резльтирующий) вращающий момент, разгоняющий ротор до скорости, близкой к синхронной. При этом скольжение двигателя относительно прямого магнитного поля $s_n \approx 0$, $n_1 \approx n_2$.

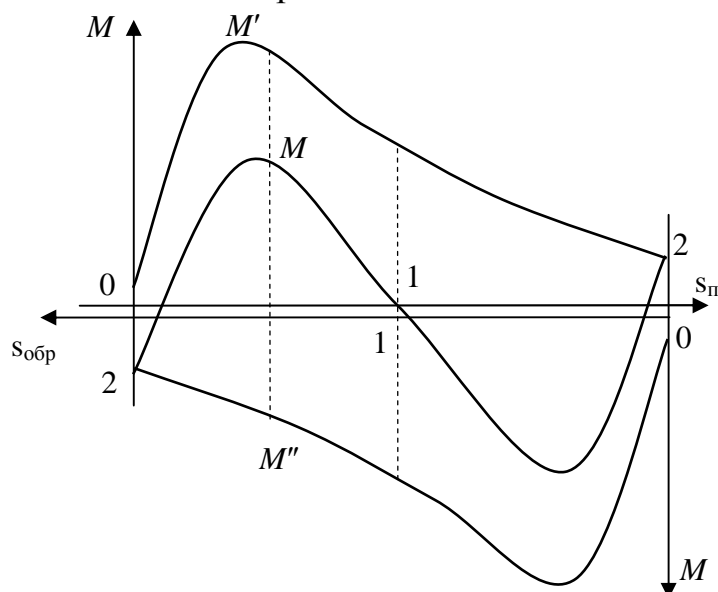


Рисунок 11.20 – Зависимости прямого и обратного моментов однофазного двигателя от скольжения

Скольжение двигателя относительно обратного магнитного поля

$$s \approx \frac{n_1 - (-n_1)}{n_1} \approx 2.$$

Рассматривая результирующую характеристику, можно сделать следующие выводы:

1. Однофазный двигатель не имеет пускового момента. Он будет вращаться в ту сторону, в которую раскручен внешней силой.
2. Из-за тормозного действия обратного поля характеристики однофазного двигателя хуже, чем трехфазного.

Однофазный асинхронный двигатель (рис. 11.21) рассчитан на питание от однофазной сети и имеет на статоре две обмотки: рабочую А и пусковую В; ротор двигателя выполняют короткозамкнутым. Переменный ток, протекая по рабочей обмотке, занимающей обычно 2/3 пазов статора, создает пульсирующую намагничивающую силу, а последняя - пульсирующее магнитное поле.

Для пуска однофазного асинхронного двигателя используют пусковую обмотку В, сдвинутую в пространстве относительно рабочей обмотки на 90° . При этом токи рабочей и пусковой обмоток должны быть сдвинуты во времени, что достигается подключением их либо к симметричной двухфазной сети, либо к однофазной сети.

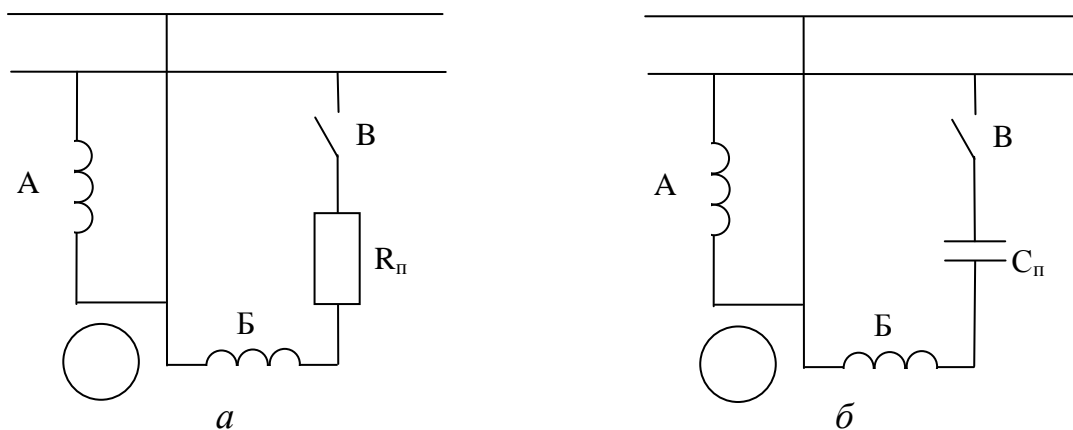


Рисунок 11.21 – Схемы включения однофазного двигателя:
а – с активным сопротивлением; *б* – с конденсатором

В последнем случае для получения сдвига фаз между токами в обмотках рабочую обмотку А подключают к сети непосредственно, а пусковую Б – через активное сопротивление (рис. 11.21, *а*) или конденсатор (рис. 11.21, *б*). Пусковая обмотка Б включается только на период пуска двигателя. При частоте вращения порядка 0,7 от синхронной частоты вращения пусковая обмотка с помощью кнопки-выключателя, центробежного выключателя или электромагнитного реле отключается, и двигатель в дальнейшем работает как однофазный.

Однофазные асинхронные двигатели по сравнению с трехфазными имеют худшие эксплуатационные характеристики, меньшие КПД и коэффициент мощности.

От однофазной сети могут работать и трехфазные асинхронные двигатели, если использовать одну из схем, представленных на рисунке 11.22.

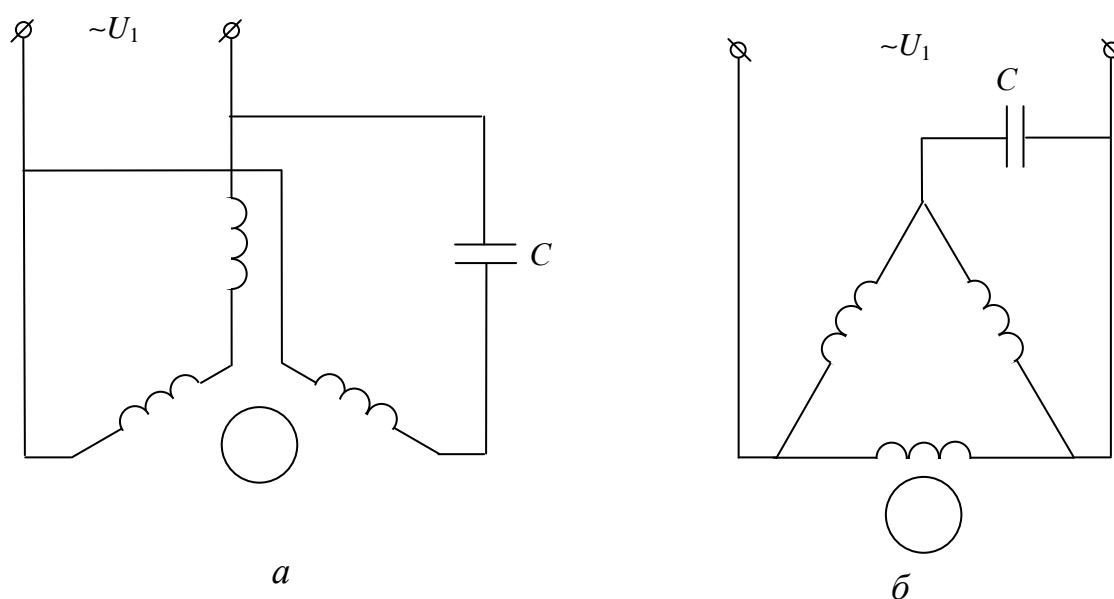


Рисунок 11.22 – Схемы включения трехфазных двигателей
в однофазную сеть

В схеме на рисунке 11.22, *а* статорные обмотки соединены звездой, а в схеме на рисунке 11.22, *б* – треугольником. Конденсатор *С* является пусковым. Он включается в сеть только на время пуска и величина его емкости составляет $C \approx 60$ мкф на 1 кВт мощности двигателя. Используются и другие схемы включения трехфазных АД в однофазную сеть, например, через активное сопротивление.

Трехфазные двигатели, работая в однофазном режиме, могут развивать мощность $P = (0,45-0,65) P_{\text{ном}}$, где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трехфазного двигателя.

Выводы

1. Асинхронная машина может работать в двигательном и генераторном режимах. В зависимости от величины скольжения различают двигательный, генераторный и режим противовключения АМ.

2. Скольжение s представляет собой относительную разность угловых скоростей поля ω_1 и ротора ω_2 .

3. В зависимости от типа обмотки ротор асинхронного электродвигателя может быть короткозамкнутым или фазным.

4. В пазы короткозамкнутого ротора уложены медные стержни, соединяющиеся с торцов короткозамкнутыми кольцами. Такая обмотка имеет вид «беличьей клетки».

5. Угловая скорость ротора ω_2 не равна синхронной угловой скорости магнитного поля ω_1 .

6. АД имеют высокую чувствительность к отклонениям напряжения сети. При сравнительно небольших снижениях напряжения резко уменьшается перегрузочная способность, что может привести к остановке двигателя.

7. В момент включения пусковой ток АД в $5 \div 7$ раз превышает свое номинальное значение. Для снижения пусковых токов применяются специальные схемы пуска АД.

8. Отличительной особенностью однофазных АД является наличие пусковой обмотки, которая включается на время пуска двигателя в работу.

9. Однофазные асинхронные двигатели по сравнению с трехфазными имеют худшие эксплуатационные характеристики, меньшие КПД и коэффициент мощности.

10. Трехфазные асинхронные электродвигатели могут работать от однофазной сети, если использовать специальную схему.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните, как устроены обмотки ротора короткозамкнутого асинхронного электродвигателя и асинхронного электродвигателя с контактными кольцами.

2. Как выбирают схему соединений обмоток статора и как установить одноименные выводы фазных обмоток статора?
3. Как создается вращающий момент асинхронного электродвигателя, и почему ротор не может самостоятельно достичь синхронной скорости вращения?
4. Как влияет на асинхронный электродвигатель изменение нагрузки на валу?
5. Какой вид имеет механическая характеристика АД и что она характеризует?
6. Как зависят ЭДС ротора и частота тока ротора от скольжения?
7. Какова роль ЭДС статора? Как записывается уравнение напряжений статора и ротора?
8. Как зависит от скольжения ток ротора и его фаза?
9. На основании каких уравнений строится полная векторная диаграмма и схема замещения асинхронного электродвигателя?
10. Какие виды потерь мощности имеют место в асинхронном электродвигателе?
11. Как зависят электрические потери в роторе от скольжения?
12. От чего зависит вращающий момент асинхронного электродвигателя? Проанализируйте его зависимость от скольжения.
13. Что понимают под коэффициентом перегрузочной способности, и какова его величина для обычных асинхронных электродвигателей?
14. Поясните условия устойчивой работы асинхронного электродвигателя.
15. От чего и как зависят критический момент и критическое скольжение?
16. Какие возможности имеются для влияния на механическую характеристику асинхронного электродвигателя?
17. По каким показателям оцениваются пусковые свойства двигателя?
18. Охарактеризуйте достоинства и недостатки прямого пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей.
19. Охарактеризуйте достоинства и недостатки пуска в ход двигателей на пониженном напряжении.
20. Как пускаются в ход двигатели с контактными кольцами? Дайте общую оценку их пусковых свойств.
21. Какие зависимости понимают под рабочими характеристиками асинхронного электродвигателя?
22. Поясните характер рабочих характеристик асинхронного электродвигателя.
23. Охарактеризуйте условие перехода асинхронного двигателя в генераторный режим. Каково практическое значение такого режима.
24. Перечислите возможные способы торможения асинхронного электродвигателя. Дайте им оценку и охарактеризуйте практическое значение.
25. Поясните устройство и принцип действия однофазного асинхронного электродвигателя.
26. Как пускают в ход однофазные асинхронные электродвигатели?

12 СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Ключевые понятия: обмотка возбуждения, возбудитель, неявнополусный ротор, явнополусный ротор, индуктор, якорь, характеристика холостого хода СМ, внешняя характеристика СГ, номинальный ток возбуждения, электромагнитная мощность, угловая характеристика, синхронизация.

Синхронные машины (СМ) применяют в качестве генераторов на электрических станциях и в качестве двигателей переменного тока в регулируемом электроприводе промышленных установок (насосов, компрессоров, воздуходувок, мельниц различного назначения, прокатных станов, дизель-генераторных установок и др.). Основное достоинство синхронных двигателей, заключающееся в их способности работать с высоким коэффициентом мощности, приводит к все более широкому применению этих электрических машин.

При работе синхронного двигателя в установившемся режиме с возрастанием нагрузки на валу до определенного значения, не превышающего максимального момента M_{\max} , его угловая скорость остается строго постоянной и равна синхронной угловой скорости:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p} . \quad (12.1)$$

12.1 Устройство синхронных машин

СМ, как и другие электрические машины, обратимы, т. е. они могут использоваться как в качестве генераторов, так и в качестве двигателей. По устройству СМ имеют много общего с асинхронными. Рассмотрим отличия в их конструкции.

Статор СМ не отличается от статора асинхронной (см. подраздел 11.2.1) – такой же собранный из листовой стали сердечник, тот же принцип выполнения и соединения его обмотки. Ротор СМ представляет собой электромагнит постоянного тока. Его обмотка питается постоянным током от постороннего источника. Она называется **обмоткой возбуждения**. Соединение обмотки ротора с источником постоянного тока осуществляется с помощью двух контактных колец на валу и неподвижных щеток. В качестве источника постоянного тока для питания обмотки возбуждения ротора обычно используется генератор постоянного тока, который чаще всего монтируется на одном валу с ротором. Такой генератор называют **возбудителем**. Мощность, требуемая для питания обмотки возбуждения, невелика и соответственно мощность возбудителя составляет около 0,3–5% от номинальной мощности СМ. Для крупных СМ устанавливается еще резервный возбудитель, который вводят в работу при неполадках в основном. Возможно также питание обмотки возбуждения от сети переменного тока, подключенной к статору, через выпрямители.

Применяются два типа ротора синхронных машин – **ротор неявнополюсный**, или с неявновыраженными полюсами, и **ротор с явно выраженными полюсами**, или **явнополюсный**. В первом случае сердечник ротора представляет собой массивное цилиндрическое тело из стали (бочка ротора) с продольными пазами, в которых закладывается обмотка возбуждения (рис. 12.1, *а*). Пазы и обмотка возбуждения размещаются так, чтобы получить синусоидальное распределение индукции в зазоре между сердечниками ротора и статора. Общий вид неявнополюсного ротора показан на рисунке 12.1, *б*. Такой ротор применяется при числе пар полюсов $p \leq 2$.

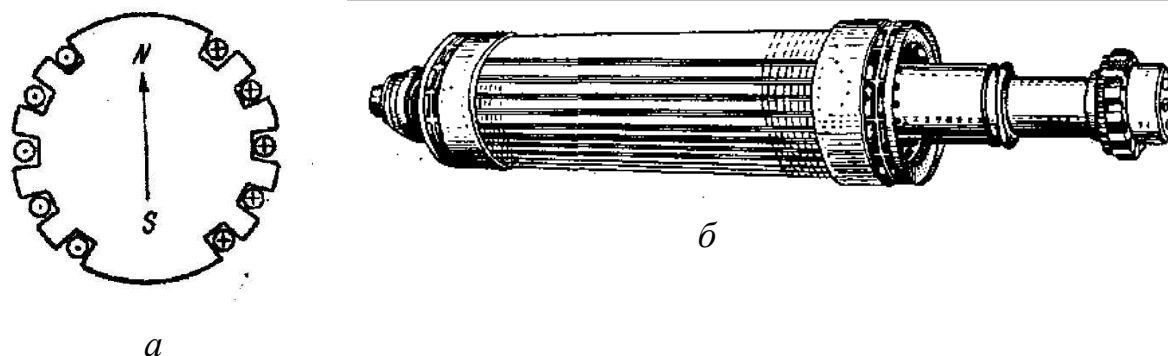


Рисунок 12.1 – Ротор неявнополюсной СМ: *а* – поперечное сечение; *б* – общий вид

Явнополюсный ротор состоит из массивного стального колеса, посаженного на вал. На внешней поверхности колеса крепятся стальные сердечники полюсов (рис. 12.2, *а*). Последние, а иногда и обод, выполняются из листовой стали. Для малых машин и при не слишком большом числе полюсов вместо колеса на вал насаживается стальная втулка, к которой крепятся полюсы. Обмотка возбуждения в виде катушек размещается на сердечниках полюсов. Для получения синусоидального распределения индукции зазор между поверхностью полюсного наконечника и внутренней поверхностью статора делается неравномерным за счет особой формы полюсных наконечников. Синусоидальное распределение индукции в зазоре необходимо для получения синусоидальной ЭДС в обмотках статора.

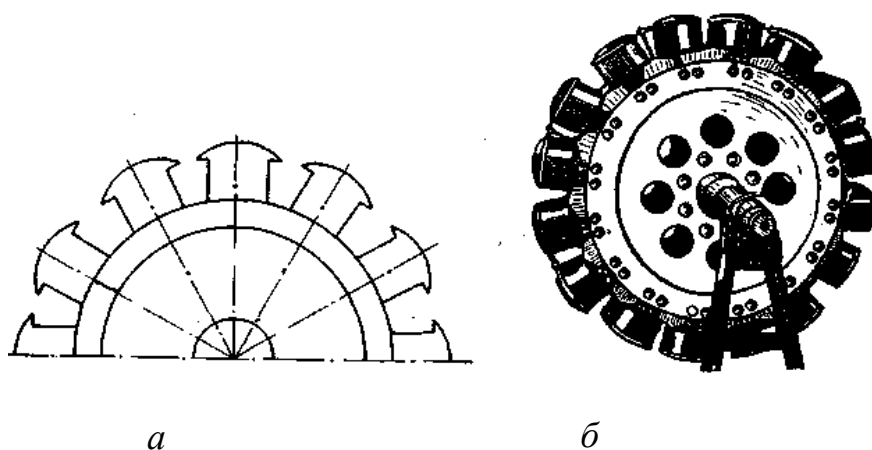


Рисунок 12.2 – Ротор явнополюсной СМ: *а* – поперечное сечение; *б* – общий вид

Общий вид явнополюсного ротора показан на рисунке 12.2, б.

Таким образом, **синхронная машина**, как и асинхронная, **состоит из магнитопровода, обмоток и механических частей**. Магнитопровод включает в себя сердечники полюсов, обод ротора, или просто тело неявнополюсного ротора, сердечник статора и зазор между ротором и статором (рис. 12.3).

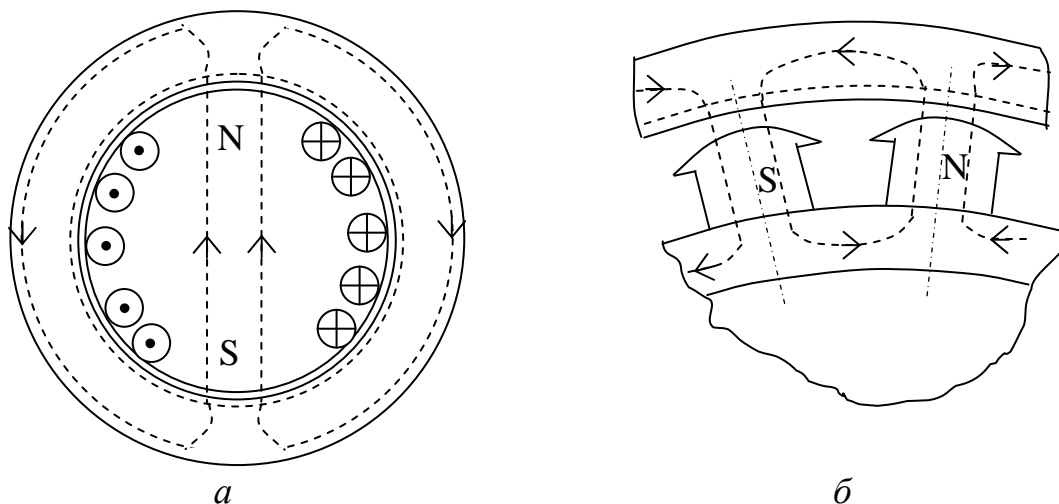


Рисунок 12.3 – Магнитный поток СМ: *а* – неявнополюсной; *б* – явнополюсной

Обмотка переменного тока СМ размещается в пазах сердечника статора. Для трехфазных машин – это три фазные обмотки, смещенные в пространстве на 120 электрических градусов. Ротор несет на себе обмотку возбуждения, питающуюся постоянным током. Механические части – корпус литой или сварной, вал, подшипниковые щиты или стойки и другие детали, необходимые для монтажа и сборки машины. У машин с неявнополюсным ротором вал обычно отковывается заодно с сердечником ротора. Ротор синхронной машины как источник магнитного поля называют **индуктором**. Часть машины, в обмотке которой при работе индуцируется ЭДС, принято называть **якорем**. У СМ обычной конструкции якорем является статор.

12.2 Синхронный генератор

В **синхронном генераторе** (СГ) происходит преобразование механической энергии в электрическую переменного, обычно трехфазного, тока. Ротор генератора с постоянным магнитным полем приводится во вращение первичным двигателем (паровой или гидравлической турбиной, дизелем и т. п.). Вследствие электромагнитной индукции в обмотках статора (якоря) индуцируются переменные ЭДС. Так как в статоре трехфазного генератора размещаются три одинаковые, симметрично смещенные в пространстве на 120 электрических градусов обмотки, то их ЭДС одинаковы по своим действующим и амплитудным значениям и симметрично смещены по фазе

на 120° . Частота ЭДС якоря определяется скоростью вращения и числом пар полюсов ротора (12.1). Частота тока стандартизована и должна быть постоянной. Из (12.1) видно, что для получения заданной частоты переменного тока необходимо обеспечить строго определенную постоянную, не зависящую от нагрузки и равную ω_0 скорость вращения. С этой целью первичные двигатели на электрических станциях оборудуют автоматическим регулированием скорости.

Требуемая для заданной частоты скорость вращения ротора тем меньше, чем больше число пар полюсов p . Поэтому генераторы, работающие от тихоходных первичных двигателей, делают многополюсными.

По роду первичного двигателя различают два основных типа синхронных генераторов - **турбогенераторы и гидрогенераторы**. Первые устанавливаются на тепловых электрических станциях и работают от паровых турбин, вторые применяются на гидроэлектростанциях. Мощности современных турбо- и гидрогенераторов часто достигают нескольких сот (500 и более) тысяч киловатт.

Для паровых турбин на тепловых электростанциях характерна высокая скорость вращения (обычно 3000 об/мин). Турбогенератор стандартной частоты $f = 50$ Гц, работающий с такой скоростью, должен иметь число пар полюсов

$$p = \frac{2\pi \cdot f}{\omega} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 60}{3000 \cdot 2\pi} = 1,$$

т. е. его ротор должен быть двухполюсным. Кроме того, при большой скорости вращения очень существенным является вопрос обеспечения механической прочности ротора. Поэтому **турбогенераторы делают с неявнополюсным ротором**. Они характеризуются сравнительно небольшими радиальными и значительными осевыми размерами.

Гидрогенераторы обычно имеют небольшие скорости вращения (50–300 об/мин). Чтобы получить переменный ток стандартной частоты $f = 50$ Гц, гидрогенераторы выполняют на большое число пар полюсов. Так, например, при скорости $n = 50$ об/мин число пар полюсов должно быть равно

$$p = \frac{2\pi \cdot f}{\omega} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 60}{50 \cdot 2\pi} = 60.$$

Для их размещения приходится увеличивать поперечные размеры генератора. Гидрогенераторы выполняются явнополюсными и имеют относительно большие радиальные размеры при умеренных осевых. Как правило, они изготавливаются для вертикальной установки. СГ изготавливаются на напряжения 0,4; 6,3; 10,5; 15; 20 кВ.

При холостом ходе генератора ток якоря равен нулю, и магнитное поле создается только обмоткой возбуждения ротора. За счет распределения обмоток статора и ротора неявнополюсной машины, а также за счет при-

дания особой формы полюсным наконечникам явнополусного ротора добиваются того, что изменение потокоосцепления обмоток якоря при вращении ротора оказывается практически синусоидальным. Это необходимо для получения синусоидальной ЭДС в якоре. Такая форма кривой ЭДС является требованием стандарта к генераторам переменного тока. В этом случае действующее значение ЭДС в обмотках якоря определяется по формуле, аналогичной для обмоток АМ (11.7), т. е.:

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot k \cdot \Phi_0, \quad (12.2)$$

где E_0 – ЭДС фазной обмотки якоря;

f – частота ЭДС якоря;

w – число витков фазной обмотки;

k – обмоточный коэффициент обмотки якоря;

Φ_0 – поток ротора, проникающий в сердечник статора.

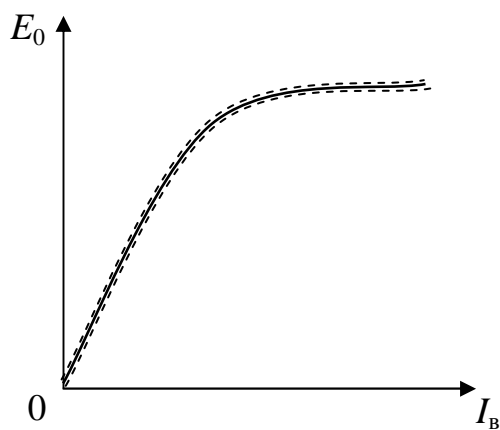


Рисунок 12.4 – Характеристика холостого хода СГ

При постоянной частоте f на величину ЭДС якоря можно влиять потоком Φ_0 , который создается током возбуждения ротора I_B . Зависимость ЭДС якоря от тока возбуждения при номинальной скорости вращения и отсутствии нагрузки якоря ($I = 0$) называется **характеристикой холостого хода**. Обычный ее вид представлен на рисунке 12.4. Так как $E_0 \equiv \Phi_0$, то $E_0 = f(I_B)$ определяется свойствами магнитной цепи машины и в другом масштабе повторяет кривую $\Phi_0 = f(I_B)$.

Характеристика холостого хода может быть построена по результатам расчета магнитной цепи или на основании опыта холостого хода. Последний проводится при номинальной скорости и отключенной нагрузке. Напряжение на якоре измеряется при постепенном увеличении тока возбуждения с нуля, а затем при его уменьшении. Вследствие гистерезиса эти напряжения могут не совпадать. Для построения характеристики холостого хода принимаются средние значения.

12.3 Внешняя характеристика синхронного генератора

Внешней характеристикой генератора называется зависимость напряжения от тока нагрузки $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $I_B = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$. Наибольший интерес представляет внешняя характеристика $U = f(I)$ при номинальных скорости, $\cos\varphi$ и токе возбуждения в диапазоне токов нагрузки от $I = 0$ до $I = I_{\text{ном}}$.

Ток возбуждения, который имеет место при номинальной нагрузке, т. е. при U_H , I_H , $\cos\varphi_H$, называется **номинальным током возбуждения**. Генераторы обычно рассчитывают для работы с номинальным коэффициентом мощности $\cos\varphi_H = 0,8-0,9$ для смешанной активно-индуктивной нагрузки. В этом случае существенное влияние оказывает продольно-размагничивающая реакция якоря. Поэтому при уменьшении нагрузки от номинальной напряжение достаточно быстро возрастает (кривая 1 на рис. 12.5).

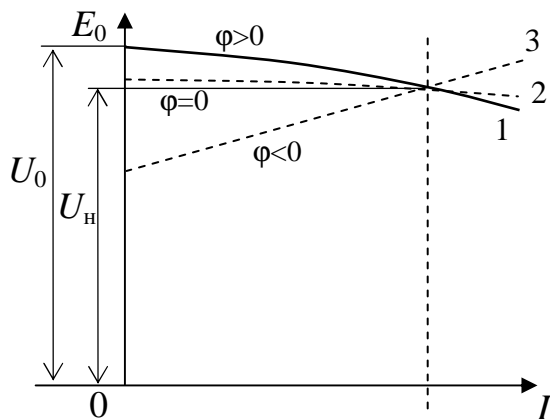


Рисунок 12.5 – Внешние характеристики синхронного генератора

Относительное изменение (повышение) напряжения при этом может достигать нескольких десятков процентов. **Под относительным изменением напряжения понимают выраженное в процентах к номинальному повышению напряжения при переходе от режима номинальной нагрузки к холостому ходу.** Оно равно

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100. \quad (12.3)$$

Так как $\cos\varphi$ нагрузки может отличаться от номинального, то это в свою очередь сказывается на внешней характеристике генератора. На рисунке 12.5 кривая 2 изображает внешнюю характеристику при активной нагрузке ($\varphi = 0$), кривая 3 – при активно-емкостной нагрузке ($\varphi < 0$). Внешняя характеристика может быть построена с помощью векторных диаграмм или по данным опыта.

Для поддержания напряжения генератора постоянным при изменении нагрузки по величине и характеру регулируют ток возбуждения ротора.

12.4 Электромагнитный момент синхронного генератора

Механическая мощность, поступающая на вал генератора, за вычетом потерь, преобразуется в электрическую. Полезная электрическая мощность генератора равна

$$P = m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (12.4)$$

где m – число фаз якоря;

U – внешнее напряжение;

I – ток якоря;

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности.

Некоторая часть электрической мощности расходуется в обмотках якоря на электрические потери в якоре: $P_{\text{эя}} = m \cdot I^2 \cdot R$. Полная электрическая мощность якоря, равная сумме полезной электрической мощности гене-

ротора и мощности потерь в якоре, называется **электромагнитной мощностью** генератора:

$$P_{эм} = P + P_{эя} = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi + m \cdot I^2 \cdot R = m \cdot I (U \cdot \cos \varphi + I \cdot R). \quad (12.5)$$

Также выражается и **электромагнитная мощность двигателя**. Только для двигателя она *представляет собой ту часть подведенной электрической мощности, которая преобразуется в механическую*.

Формула электромагнитного момента СМ имеет вид

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta, \quad (12.6)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора;

E_0 – ЭДС, создаваемая основным потоком ротора;

X – индуктивное сопротивление якоря;

$\sin \Theta$ – фазовый угол между ЭДС E_0 и напряжением U .

На рисунке 12.6 приведена упрощенная векторная диаграмма генератора (без учета активного падения напряжения в якоре $I \cdot R$, поскольку активное сопротивление якоря обычно мало).

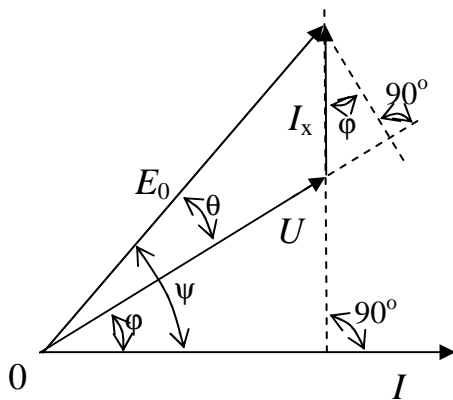


Рисунок 12.6 – Векторная диаграмма СГ

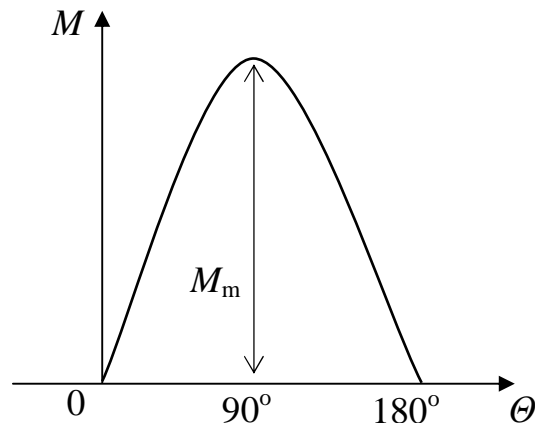


Рисунок 12.7 – Угловая характеристика СМ

Из соотношения (12.6) видно, что электромагнитный момент зависит от ЭДС E_0 , напряжения U и $\sin \Theta$. У генератора электромагнитный момент является противодействующим, он уравнивает момент первичного двигателя (паровой или гидротурбины). Для СД электромагнитный момент будет вращающим. Обязательным условием преобразования энергии в СМ (механической в электрическую в генераторе и электрической в механическую в двигателе) является наличие фазового сдвига между ЭДС E_0 и напряжением U на угол Θ . При $\Theta = 0$ угол $\psi = 90^\circ$, поскольку I_x и I взаимно перпендикулярны (см. рис. 12.6). Электромагнитный момент M и мощность $P_{эм}$ при этом равны нулю.

Фазовый угол Θ на векторной диаграмме напряжений генератора (см. рис. 12.6) соответствует смещению в пространстве осей поля ротора и

результатирующего поля на угол Θ/p при опережающем поле ротора. У синхронного двигателя - наоборот, поле ротора отстает от результирующего на угол Θ/p .

Если принять ЭДС E_0 и напряжение U постоянными, не зависящими от нагрузки (такой режим возможен, например, при параллельной работе синхронной машины с сетью), то электромагнитный момент будет зависеть лишь от $\sin\Theta$. Зависимость момента от угла Θ называют **угловой характеристикой синхронной машины** (рис. 12.7). Ее используют для оценки статической устойчивости машины при параллельной работе с сетью.

Как следует из формулы (12.6) и графика (рис. 12.7), максимальный момент машина развивает при $\Theta = 90^\circ$. Он равен

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{x}. \quad (12.7)$$

Величина максимального момента, как и для асинхронной машины, характеризует перегрузочную способность. Его можно рассматривать как предел статической устойчивости машины в условиях ее параллельной работы с сетью. Чем меньше момент, соответствующий данной нагрузке по сравнению с максимальным, тем больше запас устойчивости. Одновременно для устойчивой работы необходимо, чтобы при увеличении угла Θ возрастал электромагнитный момент. Это условие соблюдается лишь при $\Theta < 90^\circ$.

12.5 Параллельная работа синхронной машины с электрической сетью

В современной практике автономная работа СГ на свою нагрузку вне связи с другими источниками трехфазного тока встречается редко. Обычным является электроснабжение потребителей от энергетических систем. Энергосистема по линиям высокого напряжения объединяет для параллельной работы электрические станции. Наличие энергосистем дает существенные экономические выгоды, главные из которых – повышение надежности энергоснабжения и снижение стоимости производства электроэнергии.

Мощности современных энергосистем исчисляются миллионами и десятками миллионов киловатт. Каждый из генераторов, включенных в энергосистему, оказывается в режиме параллельной работы с общей сетью большой мощности. При этом можно считать, что режим работы отдельного генератора не влияет на режим работы сети, поскольку **частота и напряжение на его зажимах жестко задаются внешней сетью и не зависят от тока возбуждения, нагрузки и мощности данного генератора**. Синхронный двигатель всегда включается параллельно питающей сети.

При включении СГ на параллельную работу с сетью необходимо обеспечить как можно меньший бросок тока в момент присоединения ге-

генератора к сети. Ток в момент подключения к сети будет равен нулю, если выполняется условие равенства мгновенных значений напряжений генератора и сети

$$U_m \sin(\omega_T - \alpha_T) = U_{cm} \sin(\omega_c - \alpha_c), \quad (12.8)$$

где U_m, U_{cm} – амплитудные значения напряжений генератора и сети;

ω_T, ω_c – частота генератора и сети ($\omega = 2\pi f$);

α_T, α_c – начальные фазы генератора и сети.

Из (12.8) вытекают **условия включения СГ на параллельную работу с сетью**: равенство напряжений $U_m = U_{cm}$; равенство частот $\omega_T = \omega_c$; равенство начальных фаз $\alpha_T = \alpha_c$. Кроме того, нужно согласовать порядок чередования фаз.

Создание указанных условий с последующим включением генератора в сеть называют **синхронизацией**.

После включения СГ в сеть его напряжение U становится равным напряжению сети U_c . Относительно внешней нагрузки напряжения U и U_c совпадают по фазе, а по контуру «генератор-сеть» находятся в противофазе, т. е. $\dot{U} = -\dot{U}_c$.

На основании уравнения напряжений ток якоря определяется выражением

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX}. \quad (12.9)$$

Поскольку напряжения генератора и сети равны и противоположны по фазе, можно записать

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 + \dot{U}_c}{jX}, \quad (12.10)$$

где U_c – напряжение сети.

Генератор после включения в сеть работает в режиме холостого хода. Векторная диаграмма, соответствующая этому случаю, изображена на рисунке 12.9, а. При увеличении тока возбуждения возрастает абсолютное значение ЭДС якоря E_0 . Поскольку напряжение на зажимах задается сетью и остается постоянным, то появившаяся разность напряжений $\Delta U = E_0 - U = E_0 + U_c$ вызовет ток в якоре

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX}. \quad (12.11)$$

Ток якоря при этом отстает по фазе от ΔU и E_0 на угол $\psi = 90^\circ$ (рис. 12.9, б). Режим получается таким же, как если бы при автономной работе генератора его нагрузили на чисто индуктивную нагрузку. По отношению к сети генератор в этом режиме является источником реактивной мощности. Наоборот, при уменьшении тока возбуждения (режим недовозбуждения) снижается ЭДС E_0 , что приводит к изменению фазы ΔU и тока I

на противоположную (см. рис. 12.9, в). Ток якоря при этом опережает напряжение U и ЭДС E_0 на 90° , а по отношению к напряжению сети U_c окажется отстающим на такой же угол.

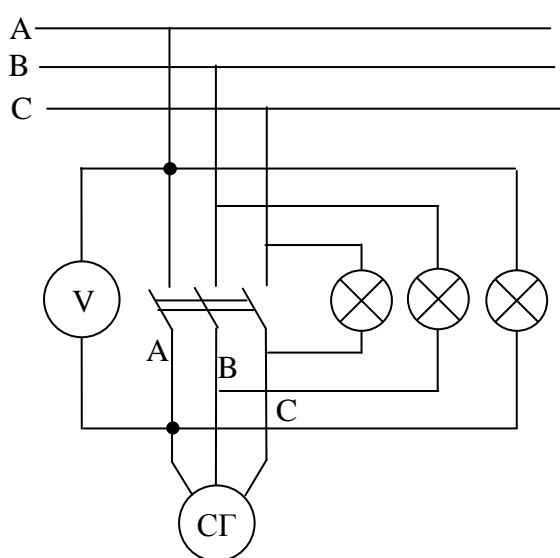


Рисунок 12.8 – Схема включения СГ в сеть

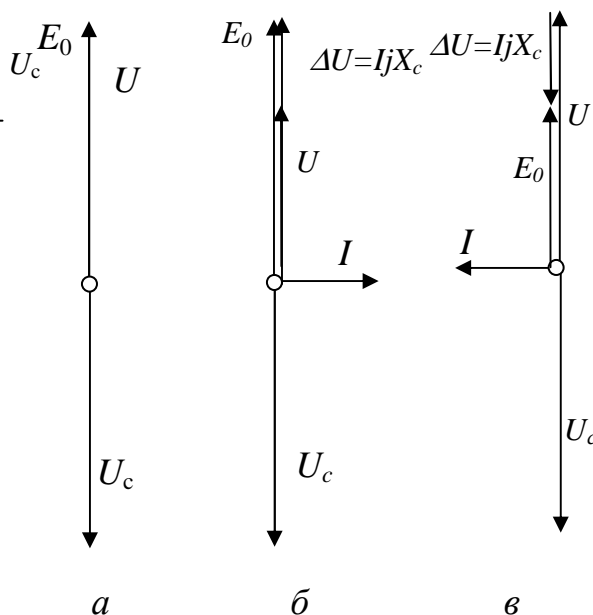


Рисунок 12.9 – Векторные диаграммы

В этом режиме генератор потребляет от сети реактивную мощность, необходимую для поддержания результирующего поля на прежнем уровне, поскольку напряжение на зажимах жестко задано. Реакция якоря при этом будет продольно намагничивающей. Нагрузка на первичный двигатель в обоих случаях остается на уровне холостого хода, так как электромагнитная мощность при $\psi = 90^\circ$ равна нулю.

Таким образом, регулирование тока возбуждения вызывает изменение лишь реактивной нагрузки генератора.

Чтобы нагрузить генератор активной мощностью, необходимо воздействовать на первичный двигатель так, чтобы придать ротору некоторое ускорение. С этой целью увеличивается впуск пара или воды в турбину. При ускорении ротора появляется сдвиг фаз между ЭДС E_0 и напряжением U на угол Θ , что является следствием пространственного сдвига между осями поля ротора и результирующего поля на угол $\frac{\theta}{p}$.

Фазовый сдвиг между ЭДС и напряжением обусловит разность напряжений ΔU , которая в свою очередь вызовет ток якоря

$$\dot{i} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jX} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX}. \quad (12.12)$$

Этот ток, отставая от ΔU по фазе на 90° , будет иметь фазовый сдвиг по отношению к ЭДС E_0 на угол $\psi < 90^\circ$ (рис. 12.10, а).

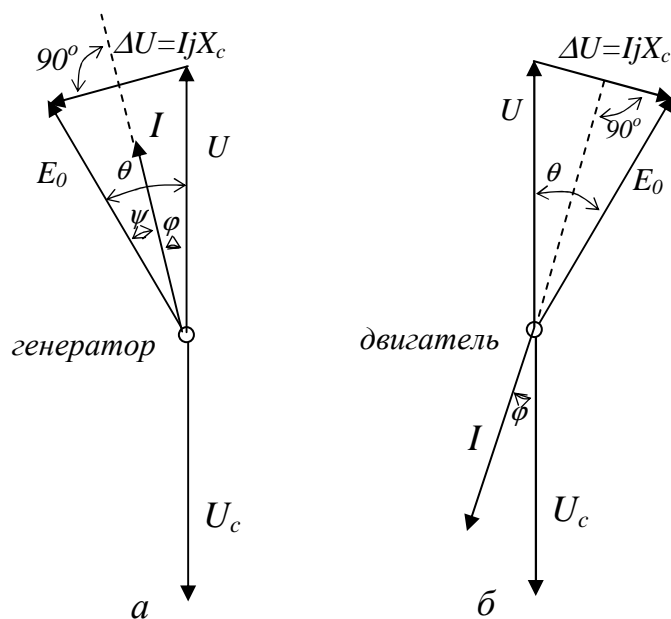


Рисунок 12.10 – Векторные диаграммы СД:
а – режим генератора, б – режим двигателя

рость вращения будет сохраняться синхронной до тех пор, пока момент первичного двигателя будет уравниваться электромагнитным моментом генератора. При угле $\Theta = 90^\circ$ электромагнитный момент оказывается максимальным (см. соотношение 12.7). Его величина является тем пределом нагрузки генератора по моменту (соответственно и по отдаваемой мощности), при котором генератор еще в состоянии работать синхронно с сетью. Если момент первичного двигателя превысит это значение, то генератор не сможет его уравновесить и выпадет из синхронизма. Параллельная работа с сетью становится невозможной.

Если после включения на параллельную работу синхронной машины не увеличить вращающий момент первичного двигателя, а, наоборот, уменьшить или даже приложить к валу тормозной момент, то ротор несколько замедлится и отстанет от результирующего поля на угол Θ/p . При этом ЭДС E_0 будет отставать от напряжения U на угол Θ . Это вызовет изменение фазы ΔU и тока якоря почти на противоположную (рис. 12.10, б). В результате этого изменится направление потока электромагнитной мощности и электромагнитного момента, который из противодействующего станет вращающим. *Машина перейдет в режим синхронного двигателя.* Вращающий электромагнитный момент уравнивает тормозной момент сопротивления, и скорость вращения останется синхронной.

Таким образом, синхронная машина, включенная параллельно с сетью большой мощности, противодействует в пределах ее статической устойчивости как ускорению, так и замедлению ротора и сохраняет скорость вращения постоянной. Изменяется лишь угол между осями поля ротора и результирующего поля в пределах ± 90 электрических градусов. Для устойчивой работы синхронные машины проектируются и изготавливаются так, что при номинальной нагрузке угол Θ обычно не превышает $20 \pm 30^\circ$. Син-

Так как $\Theta > 0$, а $\psi < 90^\circ$, то генератор при этом будет развивать электромагнитную мощность $P_{эм} = m \cdot E_0 \cdot U \cdot \cos \psi > 0$, поступающую в сеть, и электромагнитный момент

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta, \quad (12.13)$$

который уравнивает момент первичного двигателя при прежней, синхронной скорости вращения.

С увеличением момента первичного двигателя будут возрастать угол Θ , электромагнитная мощность и противодействующий момент. Ско-

хронная машина противодействует также изменению тока возбуждения соответствующим изменением реактивной нагрузки, поскольку напряжение на зажимах жестко задано.

12.6 Синхронный двигатель

В синхронном двигателе (СД) электрическая энергия переменного тока, поступающая из сети на статор, преобразуется в механическую на валу. По принципу устройства СД не отличается от генератора. В основе создания вращающего момента синхронного двигателя лежит взаимодействие переменного тока статора с постоянным магнитным полем ротора.

Для выяснения особенностей этого взаимодействия воспользуемся рисунком 12.11. На нем изображены элементы дуги статора и ротора. Пусть в некоторый момент времени направление тока в проводниках статора и положение полюсов соответствует рисунку 12.11, *а*. Согласно правилу левой руки [36] каждый из проводников статора будет испытывать механическую силу от взаимодействия его тока с полем ротора, направленную против часовой стрелки. Сила, действующая на полюсы ротора, будет противоположной. Через полпериода переменного тока $T/2$ в проводниках статора установится такой же по величине, но противоположно направленный ток.

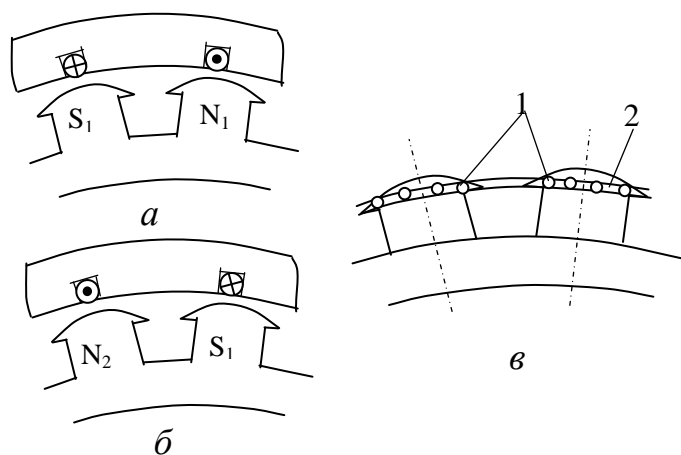


Рисунок 12.11 – Принцип действия СД

Для того чтобы направление силы, действующей на ротор при этом сохранилось, необходимо, чтобы за то же время ротор повернулся на один полюс и занял положение, показанное на рисунке 12.11, *б*. Однако в силу инерции ротор за время $T/2$ при частоте $f = 50$ Гц практически останется на месте, и поэтому в следующий полу-

период времени на него будет действовать сила обратного направления. Вследствие этого СД не может самостоятельно развернуться. Но если за счет внешней силы придать ротору предварительно такую скорость, при которой обеспечивается указанное условие, то двигатель сможет продолжать вращаться с синхронной скоростью за счет собственного электромагнитного момента. Если ротор имеет p пар полюсов, то время одного полного оборота составит pT секунд, а скорость вращения

$$\omega = \frac{2\pi}{p \cdot T} = \frac{2\pi \cdot f}{p}. \quad (12.14)$$

Направление вращения трехфазного СД определяется чередованием фаз питающей сети.

Таким образом, работа двигателя осуществляется при синхронной, не зависящей от нагрузки скорости вращения. Изменения нагрузки сказываются лишь на угле пространственного смещения между осями результирующего поля якоря и поля ротора. В отличие от генератора ротор СД отстает от результирующего поля якоря на Θ электрических градусов. В двигателе ведущим является поле якоря, за ним следует ротор.

Вращающий электромагнитный момент СД выражается такой же формулой, как и для генератора, т. е.

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta. \quad (12.15)$$

Если момент сопротивления нагрузки превысит максимальное значение (при $\Theta = 90^\circ$), то равновесие моментов оказывается невозможным, двигатель выпадает из синхронизма и останавливается. При скорости вращения меньше синхронной неизбежны положения ротора, когда $360 > \Theta > 180$. При этом момент двигателя изменит свое направление и еще больше замедлит ротор, ускоряя его остановку.

Для включения СД в сеть, он должен быть предварительно синхронизирован с ней. Требования при этом такие же, как и при включении на параллельную работу генераторов.

Чтобы придать ротору синхронизируемого двигателя синхронную скорость до включения в сеть, необходим специальный разгонный двигатель. Это неудобство в значительной мере сдерживало применение СД. Современные СД, как правило, пускаются в ход способом асинхронного пуска, при котором разгонный двигатель не требуется.

12.7 Пуск в ход синхронного двигателя

Для самостоятельного пуска в ход (без разгонного двигателя) в роторе СД укладывается специальная короткозамкнутая пусковая обмотка по типу беличьей клетки. Ее элементы показаны на рисунке 12.11, *в*. Она состоит из стержней 1, которые укладываются в предусмотренных для этого пазах, полюсных наконечников и двух замыкающих колец 2, которыми по торцам ротора стержни соединяются между собой. Стержни изготавливают из латуни, алюминиевой бронзы и других сплавов с повышенным удельным сопротивлением. Иногда обходятся без пусковой обмотки, но в этом случае полюсные наконечники делают сплошными. По торцам они электрически соединяются накладками, образующими короткозамкнутый контур, который выполняет роль пусковой клетки. В быстроходных двигателях с неявнополюсным ротором функции беличьей клетки выполняют поверхностные слои массивного цилиндрического сердечника ротора. При этом СД пускается в ход по способу асинхронного пуска. Схема такого пуска представлена на рисунке 12.12, *а*.

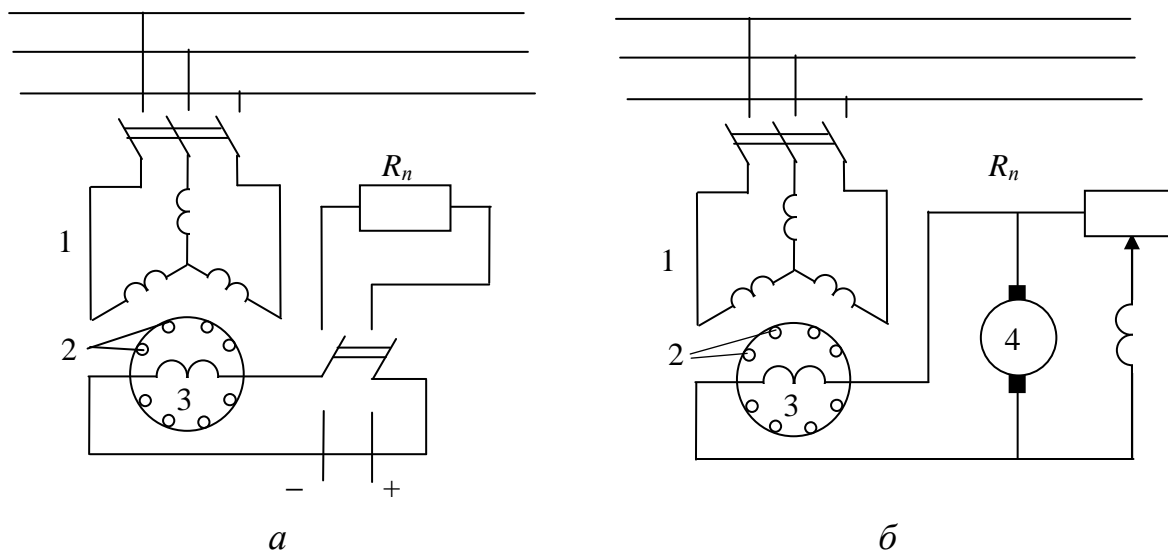


Рисунок 12.12 – Схемы асинхронного пуска СД:
 а – с пусковым реостатом; б – с подключенным возбудителем

Статор двигателя *1* включается в сеть трехфазного тока на полное напряжение (прямой пуск) или на пониженное напряжение, если необходимо уменьшить влияние пускового тока. Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в пусковой короткозамкнутой обмотке *2* ЭДС и ток, который, взаимодействуя с полем, создает вращающий момент. Ротор приходит во вращение, как и в АД. За счет асинхронного момента он достигает скорости вращения, при которой скольжение обычно не превышает 0,05. Выполнение пусковой обмотки с увеличенным активным сопротивлением позволяет получить достаточный пусковой момент. На время разгона ротора до указанного скольжения ($s = 0,05$) обмотка возбуждения *3* замыкается на внешнее сопротивление R_n , которое должно быть в 10–15 раз больше ее собственного.

Это необходимо, потому что вращающееся поле индуцирует также в обмотке возбуждения ЭДС, которая в начальный момент пуска может оказаться значительной и опасной для изоляции обмотки и для персонала. После достижения ротором скорости, близкой к синхронной ($s \approx 0,05$), обмотка возбуждения переключается на питание постоянным током от возбудителя. При этом, помимо асинхронного момента, пропорционального скольжению, появляется синхронный момент от взаимодействия тока якоря с постоянным магнитным полем ротора, который зависит от тока возбуждения (ЭДС E_0) и угла Θ .

Вследствие скольжения угол Θ непрерывно изменяется, и в промежутки времени, когда $0 < \Theta < 180^\circ$, синхронный момент, складываясь с асинхронным, ускоряет ротор, и скольжение уменьшается. При достижении $s = 0$ двигатель после некоторых качаний около синхронной скорости входит в синхронизм и продолжает работать как синхронный. Угол Θ при

этом больше нуля и меньше 90° . В рабочем режиме ток и ЭДС пусковой обмотки равны нулю, равен нулю и ее асинхронный момент, поскольку ротор вращается с синхронной скоростью. Однако при изменениях нагрузки, когда происходит изменение угла Θ и угла между осями полей Θ/p , пусковая клетка оказывает положительное влияние, уменьшая качания ротора около нового положения, соответствующего изменившейся нагрузке.

Применяется также асинхронный пуск СД с наглухо подключенным возбудителем (см. рис. 12.12, б). В этом случае обмотка возбуждения 3 подключается к якору возбудителя 4, смонтированному на одном валу, с самого начала пуска. По мере разгона двигатель возбуждается и по достижении скорости, близкой к синхронной, входит в синхронизм. Такой способ требует меньше пусковой аппаратуры для управления и автоматизации пуска.

Асинхронному пуску СД свойственны те же недостатки, что и пуску асинхронных короткозамкнутых двигателей, главным из которых является большой пусковой ток. Для ограничения пускового тока крупных двигателей прибегают к снижению на время пуска напряжения, подаваемого на статор, с помощью реакторов (индуктивных сопротивлений), включаемых последовательно в цепь статора (реакторный пуск) или с помощью автотрансформаторов (автотрансформаторный пуск). Управление пуском СД в современных установках обычно автоматизируется.

12.8 Регулирование коэффициента мощности синхронного двигателя

В подразделе 12.5 было отмечено, что при регулировании тока возбуждения СМ, включенной параллельно с сетью, изменяется реактивная мощность. Так как синхронный двигатель всегда работает в режиме параллельного подключения к сети, то к нему полностью относится сказанное. Изменение реактивной мощности при заданной активной означает также изменение коэффициента мощности $\cos\varphi$. Отсюда вытекает возможность регулирования током возбуждения ротора коэффициента мощности СД.

Поясним это с помощью векторных диаграмм СД (рис. 12.13). Пусть при данной нагрузке ток возбуждения установлен таким, что угол $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$, ток статора совпадает с напряжением по фазе. Назовем этот ток возбуждения нормальным. Соответствующая этому режиму векторная диаграмма изображена на рисунке 12.13 векторами:

$$\overline{U_c} = \overline{OB}; \quad -\overline{E_0} = \overline{OA}; \quad \overline{I} \cdot X = \overline{AB}; \quad \overline{I} = \overline{OC}.$$

Если, не изменяя нагрузку на валу, изменять ток возбуждения, то будет изменяться ЭДС якоря E_0 и угол θ , но

$$M = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E_0 \cdot U}{X} \sin \Theta = \frac{m}{\omega} \cdot \frac{E'_0 \cdot U}{X} \sin \theta' \quad (12.16)$$

остается неизменным, т. е.

$$E_0 \sin \theta = E_0' \sin \theta = E_0'' \sin \theta'' = \text{const.} \quad (12.17)$$

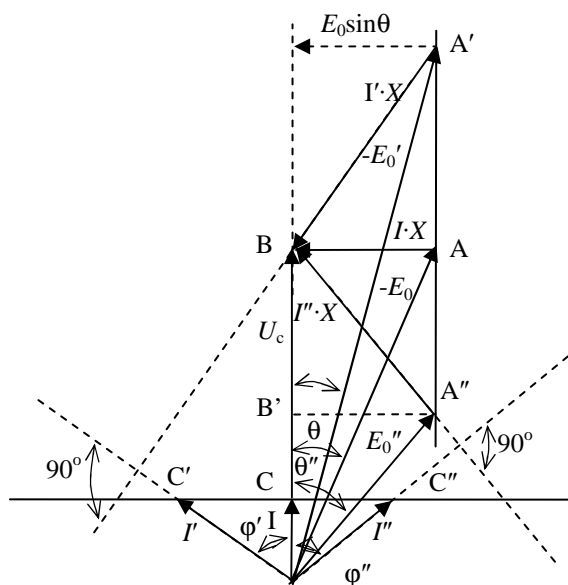


Рисунок 12.13 – Векторные диаграммы СД

Отсюда вытекает, что конец вектора $-E_0$ при изменении тока возбуждения перемещается по прямой $A'A''$, параллельной вектору напряжения U_c . За этим следует изменение величины и фазы индуктивного падения напряжения $I \cdot X$ и тока статора I . Поскольку $I \cdot X \cdot \cos \varphi = E_0 \cdot \sin \theta = \text{const}$, то и $I \cdot \cos \varphi = \text{const}$.

Следовательно, активная составляющая тока статора сохраняется неизменной. Конец вектора тока I при регулировании тока возбуждения перемещается по прямой $C'C''$, перпендикулярной вектору напряжения U_c (рис. 12.13).

Таким образом, за счет тока возбуждения оказывается возможным задать СД любой режим по коэффициенту мощности. При увеличении тока возбуждения по сравнению с нормальным ток статора опережает напряжение.

По отношению к сети двигатель ведет себя при этом как активно-емкостная нагрузка. Двигатель в таком режиме называется **перевозбужденным**.

Перевозбужденному двигателю соответствует векторная диаграмма (рис. 12.13), представленная векторами $-E_0'$, $I' \cdot X$, U_c и I' . Наоборот, при уменьшении тока возбуждения (**недовозбуждение**) двигатель потребляет отстающий ток и представляет собой активно-индуктивную нагрузку сети (векторы I'' , E_0'' , $I'' \cdot X$). Наибольший интерес представляет режим нормальной работы с $\cos \varphi = 1$ и режим перевозбуждения, когда двигатель потребляет опережающий ток. В последнем случае за счет реактивной (емкостной) составляющей тока двигателя достигается повышение $\cos \varphi$ в сети в целом, так как основная нагрузка сети чаще всего имеет активно-индуктивный характер.

СД обычно рассчитываются для работы при номинальной нагрузке в перевозбужденном режиме с $\cos \varphi = 0,8$. С изменением тока возбуждения изменяется не только фаза, но и величина тока статора. Зависимость тока статора от тока возбуждения при данной нагрузке изображается U-образной кривой (рис. 12.14). Минимум тока статора имеет место при нормальном токе возбуждения, когда $\cos \varphi = 1$. С ростом нагрузки минимум U-образных кривых смещается в сторону больших токов возбуждения.

При уменьшении механической нагрузки на валу снижается активная

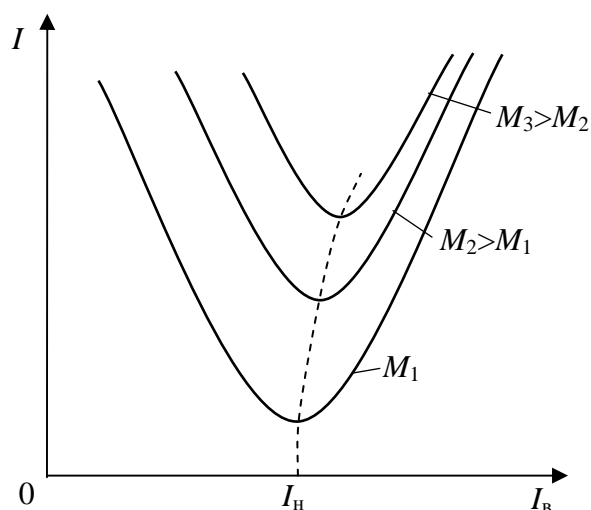


Рисунок 12.14 – Зависимость тока статора СД от тока возбуждения

составляющая тока статора, что расширяет возможный диапазон регулирования реактивной составляющей. СД на холостом ходу без нагрузки может быть использован в качестве регулируемого источника реактивной мощности сети. Для таких целей, однако, применяются специальные СМ, которые называются **синхронными компенсаторами**.

В отличие от двигателя и генератора синхронный компенсатор не испытывает механических нагрузок, и поэтому рассчитывается лишь на небольшую механическую

мощность, связанную с потерями холостого хода. Синхронные компенсаторы применяются в электрических сетях энергосистем для регулирования напряжения.

12.9 Рабочие характеристики синхронного двигателя

Под рабочими характеристиками СД понимают зависимости скорости, момента на валу, коэффициента мощности, $\cos\varphi$, КПД, потребляемых мощности и тока от полезной мощности P_2 , снимаемой с вала двигателя, при постоянных напряжении сети и токе возбуждения. Графики зависимостей имеют вид кривых, представленных на рисунке 12.15.

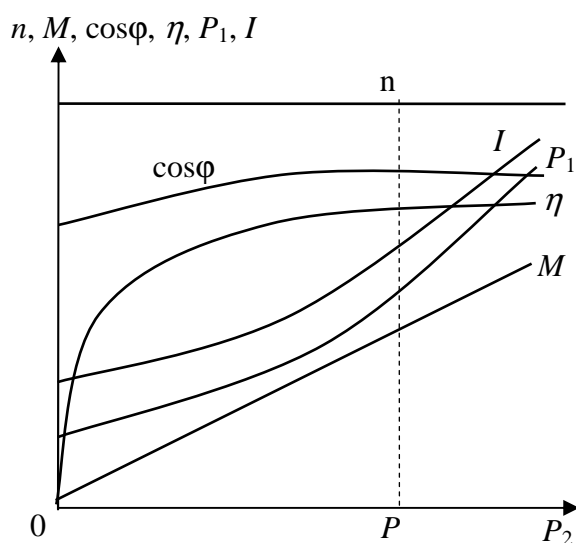


Рисунок 12.15 – Рабочие характеристики СД

Так как скорость вращения двигателя постоянна, то скоростная характеристика $n = f(P_2)$, так же как и механическая $n = f(M)$, изображается прямой, параллельной оси абсцисс, а линия момента на валу M – прямой, проходящей через начало координат.

Характер зависимости $\cos\varphi = f(P_2)$ обуславливается установленным током возбуждения двигателя. Если придать за счет тока возбуждения $\cos\varphi = 1$ при номинальной нагрузке, то при недогрузке двигатель будет потреблять опережающий ток (перевоз-

буждение), при перегрузке – отстающий ток (недовозбуждение). В обоих случаях коэффициент мощности снижается.

Кривая КПД имеет такой же вид, как и для АД. В области нагрузок от $0,3P_H$ до $1,3P_H$ изменения КПД невелики. Характеристика $\eta = f(P_2)$ представляет собой зависимость потребляемой мощности $P_1 = f(P_2)$, поскольку $P_1 = P_2/\eta$. В свою очередь из $P_1 = f(P_2)$ и $\cos\varphi = f(P_2)$ вытекает зависимость для тока, потребляемого статором из сети, $I = f(P_2)$, так как

$$I = \frac{P_1}{m \cdot U \cdot \cos\varphi}.$$

12.10 Сравнение синхронных и асинхронных двигателей

По устройству СД сложнее асинхронного, стоимость его больше. Относительная разница в стоимостях выше при небольшой мощности машин. Для работы СД требуются два рода тока. Следует отметить, что в настоящее время наряду с электромашинным возбуждением получают распространение двигатели с самовозбуждением от питающей сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

По пусковым свойствам синхронный и асинхронный двигатели примерно одинаковы. Первый обладает меньшей чувствительностью к колебаниям напряжения сети, так как его вращающий момент, в том числе и максимальный, пропорционален первой степени напряжения. У второго эта зависимость квадратичная. Кроме того, используя в необходимых случаях автоматическое форсирование (увеличение) тока возбуждения СД, оказывается возможным сохранить устойчивость его работы даже при значительных кратковременных снижениях напряжения сети. В отношении регулирования скорости вращения СД уступает асинхронному, хотя регулировочные свойства последнего также нельзя считать хорошими.

Важнейшим преимуществом СД является возможность его работы с $\cos\varphi = 1$ или даже с опережающим (емкостным) током статора. Это преимущество особенно существенно для двигателей, рассчитанных на небольшую скорость вращения, поскольку АД с малыми скоростями характеризуются низким коэффициентом мощности.

По совокупности свойств СД конкурентоспособны или даже превосходят асинхронные при мощности примерно от 100 кВт и выше. В ряде случаев оказывается целесообразным применение СД также при меньшей мощности.

Выводы

1. Синхронная машина обратима. Она может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя.

2. В синхронном генераторе происходит преобразование механической энергии в электрическую переменного трехфазного, тока. В промышленности применяются два основных типа синхронных генераторов – турбогенераторы и гидрогенераторы.

3. Частота ЭДС генератора определяется скоростью вращения и числом пар полюсов ротора. Требуемая для заданной частоты скорость вращения ротора тем меньше, чем больше число пар полюсов p . Генераторы, работающие от тихоходных первичных двигателей, делаются многополюсными.

4. Внешняя характеристика генератора характеризует зависимость напряжения от тока нагрузки $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $I_B = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$. Для поддержания напряжения генератора постоянным при изменении нагрузки по величине и характеру регулируют ток возбуждения ротора.

5. У генератора электромагнитный момент является противодействующим, он уравнивает момент первичного двигателя (паровой или гидротурбины).

6. У синхронного двигателя электромагнитный момент является вращающим.

7. Обязательным условием преобразования энергии в машине (механической в электрическую в генераторе и электрической в механическую в двигателе) является наличие фазового сдвига между ЭДС E_0 и напряжением U на угол Θ .

8. Для включения генератора на параллельную работу с сетью необходимо соблюсти равенство частот и равенство напряжений.

9. Реактивная нагрузка генератора регулируется током возбуждения.

10. В СД электрическая энергия переменного тока, поступающая из сети на статор, преобразуется в механическую на валу.

11. СД пускается в ход методом асинхронного пуска, для чего в его роторе укладывается специальная короткозамкнутая пусковая обмотка.

12. За счет изменения тока возбуждения можно задать СД любой режим по коэффициенту мощности. При увеличении тока возбуждения (режим перевозбуждения) по отношению к сети двигатель ведет себя как активно-емкостная нагрузка. При уменьшении тока возбуждения (режим недовозбуждения) двигатель представляет собой активно-индуктивную нагрузку сети.

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит основная особенность синхронных электрических машин и какова область их применения?

2. Поясните устройство и назначение основных частей синхронной электрической машины.
3. Каковы отличия в устройстве магнитопровода и обмоток синхронной машины по сравнению с асинхронной?
4. Поясните отличие синхронных машин с явнополюсным и неявнополюсным ротором.
5. В чем состоит принцип работы синхронного генератора?
6. Поясните конструктивные отличия турбо- и гидрогенераторов.
7. Что понимают под характеристикой холостого хода синхронного генератора?
8. На основании каких данных строится характеристика холостого хода синхронного генератора?
9. Что понимают под внешней характеристикой синхронного генератора, и как она зависит от характера нагрузки?
10. Что понимают под электромагнитной мощностью синхронного генератора и синхронного двигателя? Роль электромагнитного момента в синхронном генераторе и синхронном двигателе.
11. Что представляет собой угловая характеристика? Каким диапазоном угла Θ ограничивается ее устойчивая часть?
12. Условия включения синхронного генератора на параллельную работу в сеть.
13. Как влияет на режим работы синхронной машины регулирование тока возбуждения?
14. Как изменяется активная нагрузка синхронного генератора, включенного параллельно сети большой мощности?
15. При каких условиях синхронная электрическая машина переходит в режим синхронного электродвигателя? В каком диапазоне нагрузок сохраняется устойчивая работа синхронной машины, включенной параллельно сети?
16. Как влияет ток возбуждения ротора на коэффициент мощности синхронного двигателя? Проанализируйте это влияние с помощью векторной диаграммы.
17. Для каких целей используются синхронные компенсаторы и в чем их отличие от обычных синхронных машин?
18. Какие зависимости называются рабочими характеристиками синхронного электродвигателя и какой они носят характер?
19. Дайте сравнительную оценку электромеханических свойств синхронного электродвигателя по отношению к асинхронному.
20. Какова целесообразная область применения синхронного электродвигателя?

Раздел V. ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД

Промышленная электроника представляет собой отрасль науки и техники, занимающуюся изучением устройства и работы различных электронных приборов и их применения в промышленности. Сегодня электроника проникла во все отрасли современной науки, техники, промышленности. Электронные приборы используются в автоматике, телемеханике, связи, медицине, физике, машиностроении, строительной отрасли и т. д.

Одной из основных областей эффективного использования элементов промышленной электроники стал электропривод, решающий задачи управления электродвигателями различных типов и назначения. Широкое промышленное использование тиристоров обусловило значительный прогресс в области регулируемого электропривода постоянного и переменного тока. Созданы высокоэффективные устройства, преобразующие ток промышленной частоты в переменный ток регулируемой частоты для управления скоростью электродвигателей.

Электронные усилители, выпрямители, измерительные приборы и другие устройства стали мощным средством для автоматизации и контроля производственных процессов. Использование управляемых быстродействующих полупроводниковых приборов в традиционных схемах существенно расширяет их возможности в обеспечении новых режимов работы и, следовательно, новых функциональных свойств оборудования, разработанного на их базе.

13 ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Ключевые понятия: диод (вентиль), тиристор, транзистор, эмиттер, база, коллектор, выпрямитель, сглаживающий фильтр, усилитель, полоса пропускания, коэффициент усиления.

Современный научно-технический прогресс во многих отраслях промышленности, в частности в строительстве, связан с развитием электроники. Успехи электроники являются результатом создания разнообразных электровакуумных и полупроводниковых приборов. В настоящее время число различных типов приборов электроники так велико, что их полное рассмотрение выходит за рамки программы курса «Электротехника в строительстве». Поэтому рассмотрение ограничено основными типами полупроводниковых приборов, получившими широкое применение в различных устройствах, в частности в системах управления электроприводами строительных машин и механизмов.

В электронной технике выделяют силовую и информационную электронику. Одной из основных задач силовой электроники является преобразование различных видов электрической энергии, в частности переменного тока в постоянный. Информационная электроника преимущественно используется для решения задач управления информационными потоками, в частности для усиления сигналов.

В рамках данной темы рассмотрены вопросы устройства и принципов работы полупроводниковых диодов, тиристоров и транзисторов и их применения в выпрямителях и усилителях.

13.1 Элементы полупроводниковой техники

13.1.1 Принцип действия полупроводниковых приборов основан на явлении односторонней проводимости границы раздела двух полупроводников с различными типами электропроводности: электронной (электропроводность n -типа) и дырочной (электропроводность p -типа). Область электропроводности n -типа характеризуется тем, что прохождение тока здесь происходит за счет переноса отрицательно заряженных электронов, избыточное количество которых создается путем ввода в монокристалл полупроводника донорных примесей, например сурьмы, мышьяка, фосфора. В области электропроводности p -типа прохождение тока обусловлено переносом положительно заряженных “дырок” (дырка – это атом, у которого не хватает одного электрона и который, следовательно, обладает положительным зарядом, по абсолютной величине равным заряду электрона). Дырки получаются путем введения в монокристалл полупроводника акцепторных примесей, например индия, бора, алюминия.

Кроме этого в примесных полупроводниках всегда наряду с основными носителями, концентрация которых велика, существуют также и неосновные носители: дырки в полупроводниках n -типа и электроны в полупроводниках p -типа. В полупроводниках без примесей число электронов всегда равно числу дырок.

При непосредственном контактировании двух полупроводников, один из которых обладает электронной, а другой дырочной электропроводностью, получается так называемый электронно-дырочный переход (p - n переход), основным свойством которого является зависимость величины его сопротивления от полярности приложенного напряжения. Для присоединения к внешней цепи у p - n областей полупроводника создают омические контакты с выводами.

Рассмотрим на примере двухслойного кристалла кремния процессы, происходящие в p - n переходе при воздействии на него внешнего напряжения. Если к p -области приложить положительный потенциал, а к n -области – отрицательный, то основные носители тока будут двигаться в пограничном слое навстречу друг другу (рис. 13.1, a). В результате

сопротивление p - n перехода уменьшается, и через границу раздела протекает прямой ток $I_{пр}$, ограниченный практически только сопротивлением нагрузки R_H . Внешнее напряжение $U_{пр}$ такой полярности называется прямым или проводящим.

При изменении полярности приложенного напряжения (рис. 13.1, б) дырки в p -области и электроны в n -области полупроводника будут удаляться от границы раздела, что приводит к увеличению сопротивления p - n перехода, а поток основных носителей уменьшается до нуля. Через p - n переход проходит незначительный ток, создаваемый неосновными носителями, для которых приложенная разность потенциалов является ускоряющей. Внешнее напряжение такой полярности называется обратным $U_{обр}$ или запирающим, а обусловленный им небольшой ток – обратным током $I_{обр}$.

Таким образом, значение и направление тока, проходящего через p - n переход двухслойной полупроводниковой структуры, зависят от значения и знака внешнего напряжения, т. е. p - n переход обладает выпрямляющими (вентильными) свойствами.

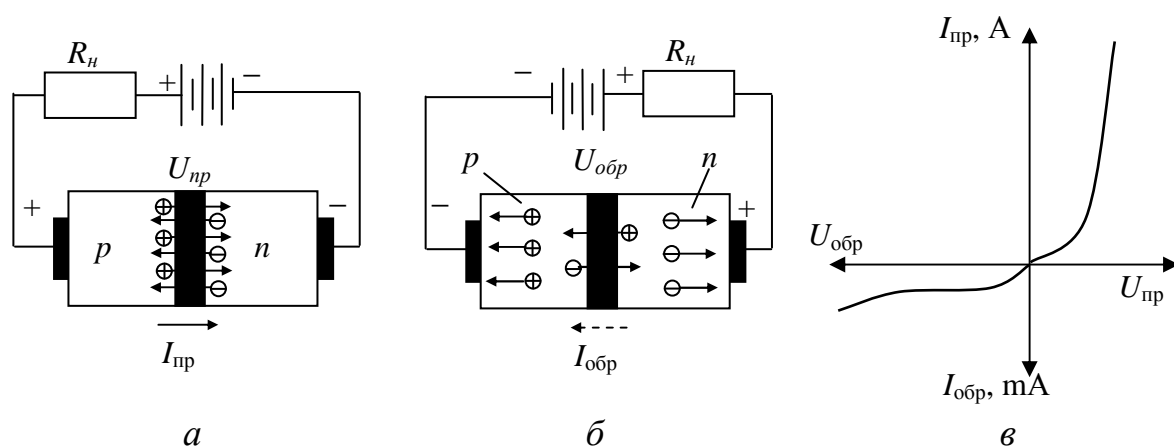


Рисунок 13.1 – Прохождение тока через p - n переход полупроводникового диода: a – открытое (проводящее) состояние; $б$ – закрытое (непроводящее) состояние; $в$ – вольт-амперная характеристика.

Зависимость тока I , проходящего через p - n переход, от приложенного к нему напряжения U называется **вольт-амперной характеристикой (ВАХ) перехода**. Эта характеристика имеет две ветви (рис. 13.1, в): одна расположена в первом квадранте и соответствует проводящему направлению в p - n переходе (прямому току в нем), вторая – в третьем квадранте и характеризует запирающие свойства перехода.

13.1.2 Неуправляемые диоды. В устройствах промышленной электроники используются кремниевые, германиевые и селеновые неуправляемые диоды. Иногда их называют вентилями.

Кремниевые диоды. Рассмотрим устройство и ВАХ кремниевого диода (см. рис. 13.2). Исходным материалом этих диодов являются тонкие

пластинки, вырезанные из монокристалла кремния с электронным типом электропроводности, в которых сплавлением с алюминием либо диффузией в кремний атомов алюминия или бора создается слой с электропроводностью p -типа.

Кремниевый диск с p - n переходом впаивается между молибденовыми пластинками (рис. 13.2, *а*), обладающими примерно таким же коэффициентом линейного расширения, как и кремний, и хорошей теплопроводностью. Электрод, присоединяемый к слою полупроводника с электропроводностью n -типа, является **катодом** K , а электрод, присоединяемый к слою с электропроводностью p -типа – **анодом** A (рис. 13.2, *а* и *б*).

Полученная таким образом двухслойная монокристаллическая p - n структура помещается в неразборный герметичный металlostеклянный или керамический корпус, предохраняющий ее от внешних воздействий (влаги, грязи, механических повреждений).

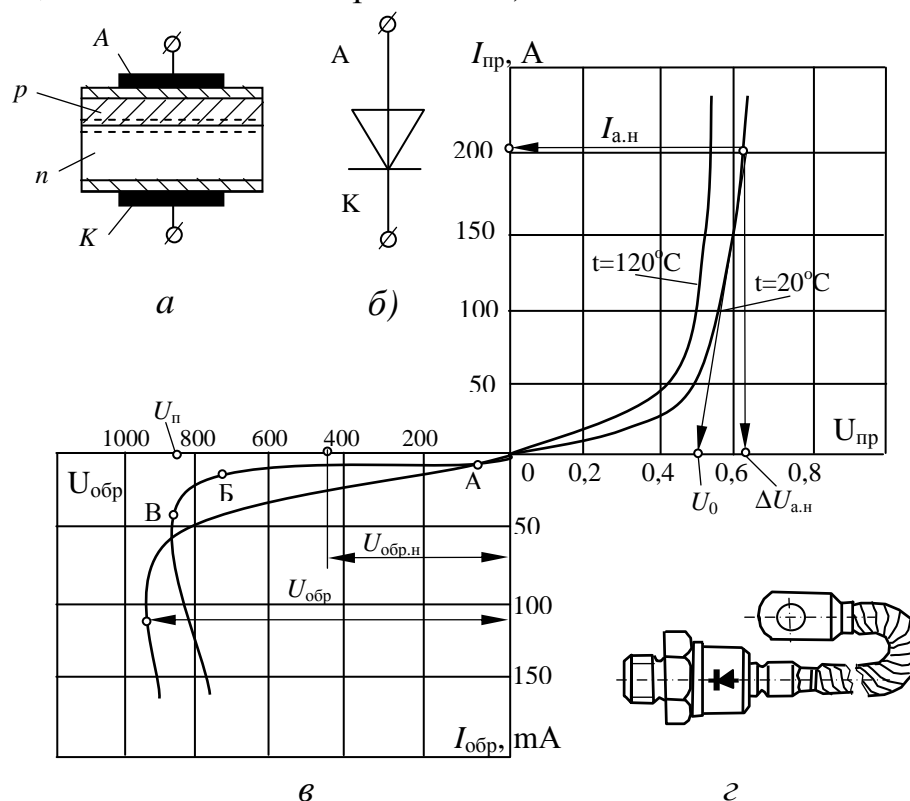


Рисунок 13.2 – Кремниевый диод:
а – устройство, *б* – условное обозначение, *в* – статические ВАХ при различных температурах p - n перехода; *г* – конструкция

Нижняя часть корпуса выполняется в виде шестигранной гайки и заканчивается шпилькой с резьбой для ввинчивания вентиль в охладитель (рис. 13.2, *г*). Такая конструкция корпуса диода обеспечивает хороший отвод тепла от p - n перехода в окружающую среду и служит в качестве наружного вывода катода. Внешним выводом анода является гибкий медный провод с наконечником, изолированный от корпуса изолятором.

На рисунке 13.2, *в* изображены ВАХ кремниевого диода на номинальный ток 200 А. Прямая ветвь содержит два характерных участка: на пер-

вом, совпадающем с осью абсцисс, участке вентиль имеет сравнительно большое сопротивление и с ростом прямого напряжения ток растет незначительно; на втором участке при увеличении $U_{пр} > U_0$ сопротивление вентиля резко уменьшается, а прямой ток $I_{пр}$ возрастает до значений, определяемых сопротивлением нагрузки.

На обратной ветви различают три характерных участка: первый участок *ОА* (рис. 13.2, в) сравнительно невелик, вентиль обладает еще малой проводимостью, и через переход протекает небольшой ток $I_{обр}$, измеряемый миллиамперами; на втором участке *АВ* при значительном увеличении обратного напряжения ток $I_{обр}$ достигает насыщения и незначительно возрастает; третий участок *ВВ* характерен тем, что при определенных значениях обратного напряжения ток $I_{обр}$ резко возрастает, и наступает пробой *p-n* перехода. Величина напряжения $U_{п.}$, при котором обратная ветвь резко изгибается, называется пробивным напряжением.

Для нормальной работы вентиля наибольшее допустимое (номинальное) обратное напряжение $U_{обр.н}$ берут вдвое меньшим по сравнению с пробивным напряжением $U_{п.}$

Кремниевые силовые вентили выпускаются на токи от 10 до 1000 А и обратные напряжения от 100 до 1500 В.

Германиевые диоды по сравнению с кремниевыми обладают меньшим прямым падением напряжения, а также меньшими значениями допустимых обратных напряжений (500–600 В по сравнению с 700–1500 В у кремниевых диодов). Обратный ток этих диодов на порядок больше, чем у кремниевых.

Селеновые диоды допускают значительно меньшие плотности прямого тока 50–60 мА/см² и меньшие значения обратного напряжения 40–50 В, чем германиевые и кремниевые, допускающие плотности прямого тока 40–80 А/см² и значения обратного напряжения 400–1200 В.

Для повышения значения $U_{обр.доп}$ широко используется последовательное соединение селеновых элементов в одном выпрямительном столбике, при этом не требуется применения делителей напряжения (уравнивающих сопротивлений), в которых нуждаются германиевые и кремниевые диоды.

Характерной особенностью селеновых выпрямителей является большая перегрузочная способность (так как они имеют значительную тепловую инерцию) по сравнению с германиевыми и кремниевыми, а также меньшая чувствительность к кратковременным перенапряжениям. Это происходит потому, что при случайных перенапряжениях место пробоя застекловывается аморфным селеном и селеновый элемент восстанавливает свои свойства.

Отмеченные свойства селеновых выпрямителей являются стимулом к применению их в выпрямителях на низкие напряжения и большие токи: зарядные устройства, гальванические и электролитические установки и др.

ВАХ полупроводниковых диодов зависят от температуры p - n перехода. С ростом температуры у всех типов диодов имеют место: снижение прямого падения напряжения (см. рис. 13.2, в) при тех же прямых токах; значительное увеличение обратного тока, сопровождаемое некоторым увеличением пробивного напряжения у кремниевых и селеновых диодов.

13.1.3 Управляемые диоды – тиристоры. Основным элементом управляемых диодов (другое название – тиристоров) является кремниевый диск с электронным типом электропроводности, в котором специальными технологическими методами создается четырехслойная полупроводниковая структура, в которой чередуются слои с разными типами электропроводности (p - n - p - n). В результате получается монокристаллическая структура с тремя p - n переходами $\Pi_1 - \Pi_2 - \Pi_3$, включенными последовательно (рис. 13.3, а).

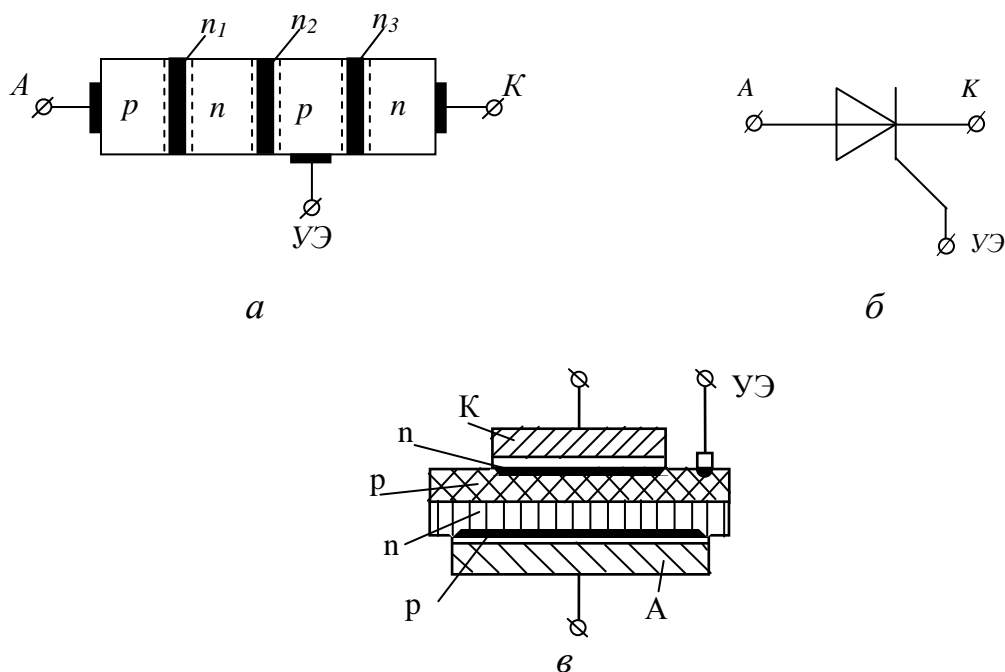


Рисунок 13.3 – Управляемый кремниевый диод – тиристор.
а – схема четырехслойной структуры; б – условное обозначение;
в – устройство тиристора (схематическое).

Полупроводниковая структура тиристора монтируется либо в металлостеклянный, либо в керамический корпус, основание которого имеет шпильку с резьбой и является внешним выводом анода, а катодом – гибкий медный вывод с наконечником. Управляющий электрод выводится в сторону катода (рис. 13.4, в), либо помещается в металло-керамический таблеточный корпус круглой формы, который герметизируется холодной сваркой.

Таблеточный корпус диода с помощью прижимного устройства соединяется с охладителями из алюминиевых сплавов, обеспечивая электрические и термические контактные соединения структуры кор-

пуса и охладителей, которые имеют развитую поверхность. Токоотвод от анода и катода тиристора осуществляется непосредственно с охладителей при помощи медных шин, вывод от управляющего электрода расположен сбоку.

При включении тиристора в электрическую цепь с регулируемым источником постоянного тока (рис. 13.4, а), полярность которого можно изменять, связь между током, проходящим через тиристор в прямом и обратном направлениях, и напряжением между анодом и катодом отражает статическая ВАХ (рис. 13.4, б). Если цепь управляющего электрода тиристора не подключена к источнику U_y , а напряжение между анодом и катодом не превышает допустимое значение $U_{пер}$, то независимо от полярности приложенного напряжения $U_{ист}$ между анодом и катодом ток практически не проходит.

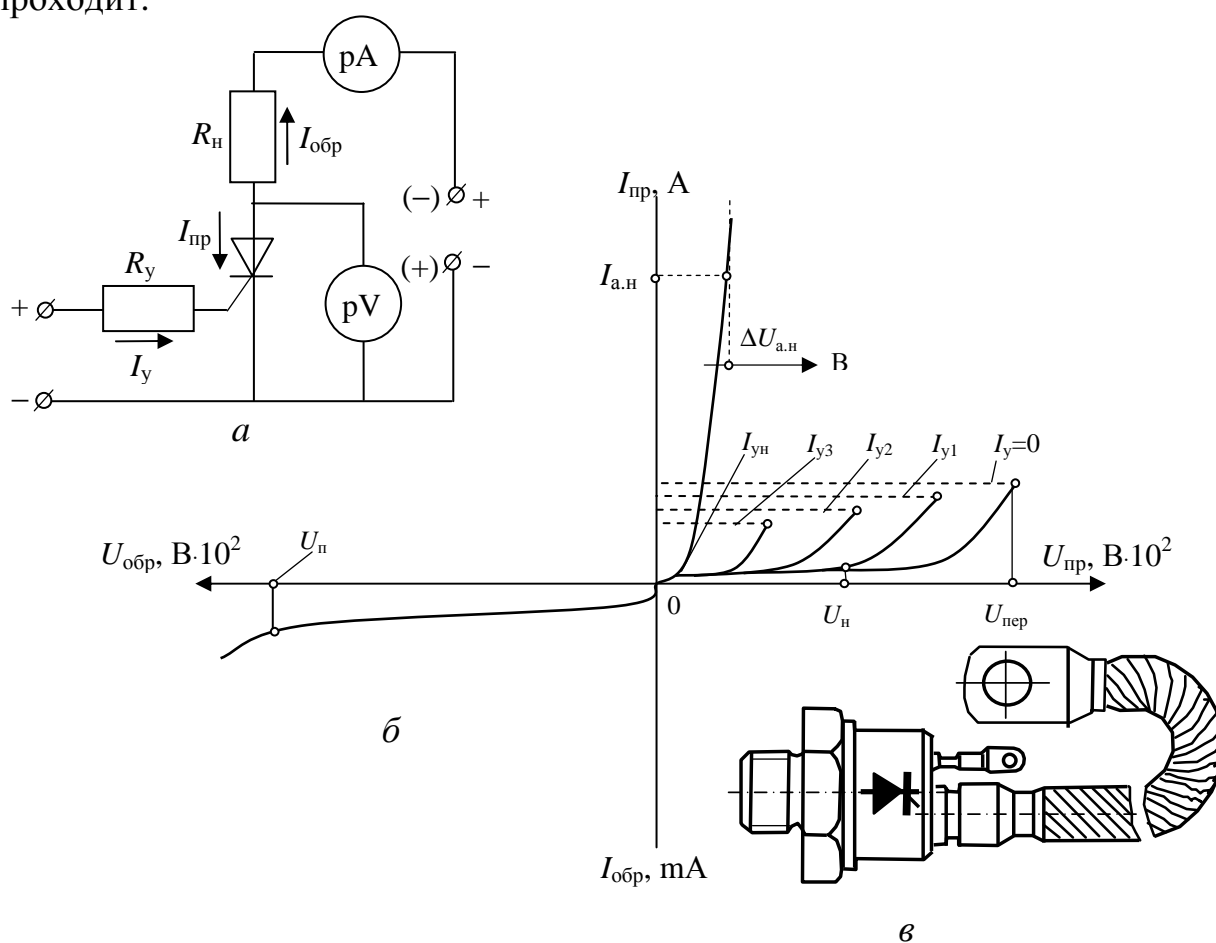


Рисунок 13.4 – Тиристор: а – схема для снятия характеристик; б – статические ВАХ; в – общий вид тиристора без радиатора

Действительно, если на анод тиристора подается отрицательный потенциал, а на катод – положительный, то к среднему переходу Π_2 (рис. 13.3, а) будет приложено прямое напряжение, а к переходам Π_1 и Π_3 , соединенным последовательно, обратное напряжение $U_{пр}$. Тиристор оказывается запертым. Через него и во внешней цепи проходит небольшой обратный ток $I_{обр}$, что соответствует обратной ветви ВАХ тиристора, которая подобна ветви $I_{обр} = f(U_{обр})$ силового кремниевого диода

(см. рис. 13.2, в). Если же к аноду и катоду тиристора приложить потенциалы с противоположной полярностью, то к переходу P_2 будет приложено обратное напряжение, что снова определяет закрытое состояние тиристора.

Перевод тиристора из закрытого состояния в открытое может быть осуществлен двумя способами:

1) подачей на анод тиристора прямого напряжения, превышающего напряжение переключения $U_{пер}$ (рис. 13.4, б), при этом резко уменьшается его сопротивление (тиристор открывается) и увеличивается ток, значение которого ограничивается сопротивлением внешней цепи. Однако такое открывание по аноду (напряжением) для тиристоров обычно не допускается;

2) подачей на управляющий электрод положительного импульса напряжения U_v при прямом напряжении на аноде тиристора. Под действием U_v через переход P_3 будет проходить небольшой ток I_v , нейтрализующий действие закрытого перехода P_2 , и тиристор открывается при меньшем значении $U_{пер}$. В направлении от анода к катоду тиристора будет проходить прямой ток $I_{пр}$, значение которого практически ограничивается только сопротивлением внешней цепи R_n , так как падение напряжения в открытом тиристоре мало и не превышает 0,5–1,2 В (рис. 13.4 – прямая ветвь).

Такой процесс отпирания тиристора происходит очень быстро (не более 15–20 мкс). С ростом I_v снижается напряжение переключения $U_{пер}$ тиристора и открытому состоянию прибора соответствует ВАХ обычного неуправляемого диода. Если изменить полярность напряжения, приложенного между анодом и катодом тиристора, то ранее открытый переход P_2 в течение 25–250 мкс (в зависимости от мощности тиристора) восстанавливает свои запирающие свойства, и тиристор снова готов к работе.

При питании тиристора от источника постоянного тока его запирающие свойства можно восстановить только путем разрыва анодной цепи или с помощью специальных устройств кратковременно создать на аноде отрицательное напряжение. При питании от источника переменного напряжения тиристор закрывается во время отрицательной полуволны напряжения.

13.1.4 Полупроводниковые триоды – транзисторы являются электронными приборами, основанными на свойствах двух, расположенных весьма близко друг от друга электронно-дырочных $p-n$ переходов. Наличие трех слоев с различной проводимостью обуславливает на границах их раздела два $p-n$ перехода, характеризующихся динамическим равновесием.

Транзисторы делятся на две группы – биполярные и униполярные. К биполярным относятся транзисторы, ток в которых обусловлен носителями двух типов (электронами и дырками). В униполярных (их еще называют полевыми) транзисторах ток обусловлен носителями только одного знака (или электронами или дырками). Устройство и принцип работы транзистора рассмотрим на примере биполярных транзисторов.

Биполярный транзистор представляет собой трехслойную структуру типа $n-p-n$ (рис. 13.5) и типа $p-n-p$. На рисунке 13.6, *а* и *б* показаны условные изображения этих транзисторов. Транзистор называется биполярным, потому что физические процессы в нем связаны с движением носителей зарядов обоих знаков (свободных дырок и электронов).

Средний слой биполярного транзистора называется **базой** *Б*, один крайний слой – **коллектором** *К*, а другой крайний слой – **эмиттером** *Э*. Каждый слой имеет вывод, при помощи которого транзистор включается в цепь.

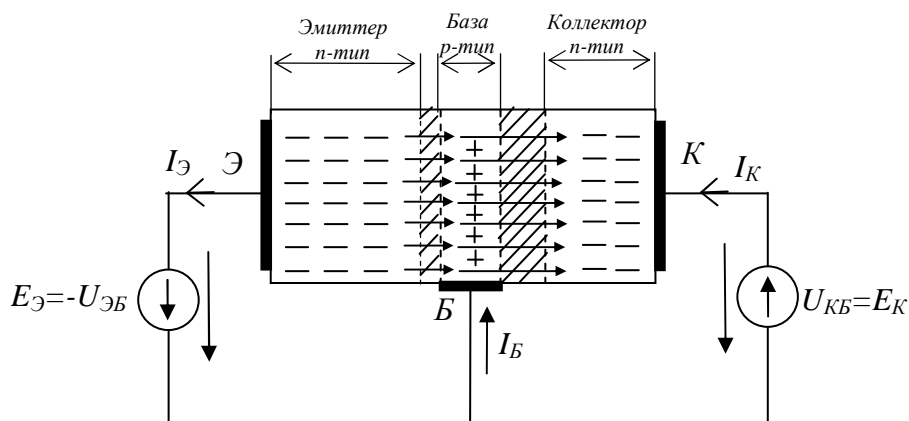


Рисунок 13.5 – Биполярный транзистор типа $n-p-n$

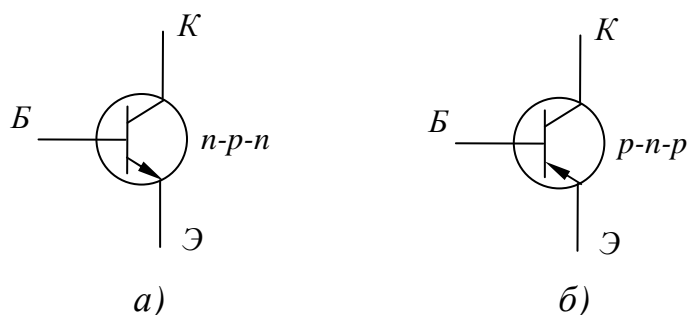


Рисунок 13.6 – Обозначения транзисторов:
а – типа $n-p-n$; *б* – типа $p-n-p$

Возможны три варианта схемы включения транзистора (см. табл. 13.1): с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК).

Независимо от схемы включения транзисторы могут работать в одном из четырех, отличающихся полярностью напряжения на переходах эмиттер-база и коллектор-база, режимах.

1. Нормальный активный режим, в котором переход эмиттер-база включен в прямом направлении, а переход коллектор-база - в обратном;
2. Инверсный активный режим, в котором переход эмиттер-база включен в обратном направлении, а переход коллектор-база - в прямом;
3. Режим отсечки, в котором оба перехода включены в обратном направлении;

4. Режим насыщения, в котором оба перехода включены в прямом направлении.

Таблица 13.1 – Схемы включения транзисторов

с общим эмиттером	с общей базой	с общим коллектором

Режим насыщения и режим отсечки используются в цифровых и импульсных устройствах.

В схемах, в которых транзистор применяется для усиления сигналов, основным является его активный режим работы. При подключении положительного полюса источника постоянной ЭДС $E_э = -U_{эб}$ к базе потенциальный барьер $p-n$ перехода ($n-p-n$ транзистор на рис. 13.5) между базой и эмиттером понижается. Свободные электроны диффундируют (инжектируются) из эмиттера в базу, образуя ток $I_э$ в цепи эмиттера. Если между коллектором и базой включен источник постоянной ЭДС $E_к = U_{кб}$ отрицательным полюсом к базе, то увеличивается потенциальный барьер $p-n$ перехода между базой и коллектором. Большая часть электронов, инжектированных из эмиттера в базу, втягивается сильным электрическим полем с напряженностью $E_{кб}$ этого $p-n$ перехода, образуя ток $I_к$ в цепи коллектора. Заметим, что электрическое поле в переходе коллектор-база существует и при разомкнутой ветви с источником ЭДС $E_к$. Поэтому ток коллектора от значения напряжения $U_{кб} > 0$ зависит мало. Незначительная часть свободных электронов, инжектированных из эмиттера в базу, образует ток $I_б$ в цепи базы.

Связь между токами коллекторной и эмиттерной цепей транзистора характеризуется коэффициентом передачи тока

$$\alpha = i_к / i_э. \quad (13.1)$$

Число рекомбинирующих в базе основных носителей заряда эмиттера определяет ток базы: $i_б = i_э - i_к$. При рассмотрении усилительных свойств транзисторов для переменных сигналов схемы их включения рассматривают без источников питания, так как по сравнению с другими сопротивлениями внутренние сопротивления источников питания малы. Наиболее часто используют схему с ОЭ (см. табл.13.1), с помощью которой осуществляют усиление по току, напряжению, мощности. Для этой схемы коэффициенты усиления по току, напряжению и мощ-

ности определяются из выражений:

$$k_i = \frac{i_{\text{блх}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_{\kappa}}{i_{\sigma}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta > 1; \quad (13.2)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{блх}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{i_{\kappa} \cdot R_{\text{н}}}{i_{\sigma} \cdot R_{\text{вх}}} = \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{эб}}} > 1; \quad (13.3)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u = \frac{\alpha^2}{1-\alpha} \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{эб}}} > 1, \quad (13.4)$$

где $R_{\text{эб}}$ – сопротивление перехода эмиттер-база;

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}.$$

При этом выходное напряжение $u_{\text{вых}}$ находится в противофазе с входным напряжением $u_{\text{вх}}$.

Для схемы транзистора с ОБ коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности находят из выражений:

$$k_i = \frac{i_{\text{блх}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_{\kappa}}{i_{\sigma}} = \alpha < 1; \quad (13.6)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{блх}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{i_{\kappa} \cdot R_{\text{н}}}{i_{\sigma} \cdot R_{\text{вх}}} = \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{эб}}} > 1; \quad (13.7)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u = \alpha^2 \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{эб}}} > 1. \quad (13.8)$$

Включение транзистора по схеме с общей базой применяется обычно на более высоких частотах, однако эта схема характеризуется коэффициентом усиления по току меньшим единицы $k_i < 1$. При этом выходное напряжение $u_{\text{вых}}$ оказывается в фазе с входным напряжением $u_{\text{вх}}$.

Для схемы транзистора с ОК коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности находят из выражений:

$$k_i = \frac{i_{\text{блх}}}{i_{\text{вх}}} = \frac{i_{\text{э}}}{i_{\sigma}} = \frac{i_{\kappa} + i_{\sigma}}{i_{\sigma}} = \beta + 1 = \frac{1}{1-\alpha} > 1; \quad (13.9)$$

$$k_u = \frac{u_{\text{блх}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{u_{\text{блх}}}{u_{\text{блх}} + u_{\text{эб}}} = \frac{i_{\text{э}} \cdot R_{\text{н}}}{i_{\text{э}} (R_{\text{н}} + R_{\text{эб}})} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{эб}}} \leq 1; \quad (13.10)$$

$$k_p = k_i \cdot k_u \cong k_i = \beta + 1 = \frac{1}{1-\alpha} > 1. \quad (13.11)$$

Выходное напряжение для схемы с ОК находится в фазе с входным.

Рассматривая основные усилительные схемы включения, исходят из того, что работа транзистора происходит на линейных участках его характеристик, что соответствует малым входным сигналам, и при расчете ко-

эффицентов усиления транзисторно-резисторных усилителей, учитывая условия работы на средних частотах, влиянием входных, переходных и выходных емкостей пренебрегают.

Основными характеристиками транзисторов являются *статические входная и выходная характеристики*, вид которых зависит от схемы включения транзистора. В качестве примера рассмотрим эти характеристики для схемы с ОЭ (рис. 13.7).

Под входной характеристикой транзистора понимают зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном выходном напряжении. Для схемы с ОЭ это $I_{\text{б}}(U_{\text{б}})$ при $U_{\text{к}} = \text{const}$.

Под выходной характеристикой понимают зависимость выходного тока от выходного напряжения при постоянном входном токе. Для схемы с ОЭ это $I_{\text{к}}(U_{\text{к}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$.

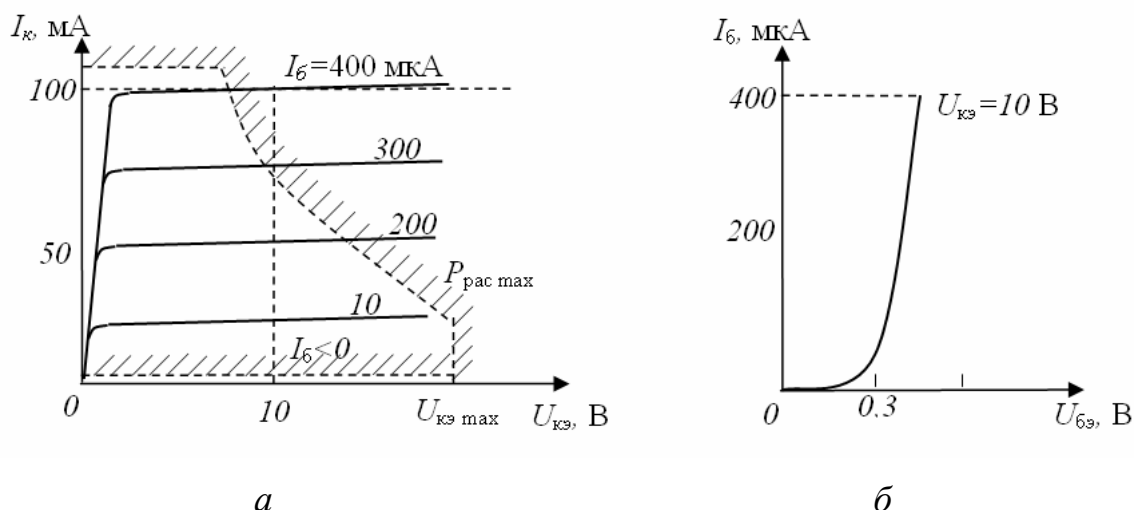


Рисунок 13.7 – Статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ:
а – выходная характеристика; б – входная характеристика

Статические характеристики биполярного транзистора показаны на рисунке 13.7. Область рабочих режимов транзистора на его характеристиках ограничена максимально допустимыми значениями тока $I_{\text{к.мах}}$, напряжения $U_{\text{кэмах}}$ и мощности рассеяния $P_{\text{рас мах}} \approx U_{\text{кэ}} \cdot I_{\text{к}}$, а также нелинейными искажениями при малых значениях тока коллектора.

Основное достоинство биполярных транзисторов – высокое быстродействие при достаточно больших токах коллектора. Наличие внешних теплоотводов позволяет работать биполярным транзисторам при мощности рассеяния до 50 Вт и токах до 10 А. Их основной недостаток – относительно небольшое сопротивление входной цепи при включении по схеме с ОЭ (1–10 кОм).

13.2 Полупроводниковые выпрямители

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный. На практике применяется много схем выпрямителей как однофазного, так и трехфазного тока. Выбор той или иной схемы определяется свойствами применяемых диодов и условиями работы выпрямителя. Например, в выпрямительных агрегатах для зарядки аккумуляторных батарей, где требуются небольшие значения выпрямленного напряжения, наиболее приемлемыми оказались схемы однофазного выпрямления с селеновыми диодами. При выпрямлении высоких напряжений до 1000–1500 В часто прибегают к последовательному соединению диодов или применяют диоды на большие значения $U_{обр}$.

Рассмотрим работу основных схем выпрямления однофазного и трехфазного тока, предполагая для простоты расчетов и облегчения понимания физической сущности процессов в элементах схем, что выпрямитель работает на активную нагрузку и состоит из идеальных диодов и трансформатора, что позволяет пренебречь падениями напряжения, а также обратными токами диодов, индуктивностями и намагничивающим током трансформатора.

Основными элементами выпрямителя (рис. 13.8) обычно являются: силовой трансформатор 1, служащий для согласования входного U_c и выходного U_d напряжений выпрямителя, а также для электрического разделения питающей сети и цепи нагрузки; блок выпрямительных элементов 2, осуществляющий выпрямление переменного тока; сглаживающий фильтр 3, служащий для уменьшения пульсации выпрямленного тока в цепи нагрузки 4. Если выпрямитель управляемый, то в блок-схему входит еще узел б, содержащий систему управления выпрямительным блоком (тиристорами). Для защиты выпрямителя от повреждений при аварийных режимах в его схему входит блок защиты и сигнализации 5.

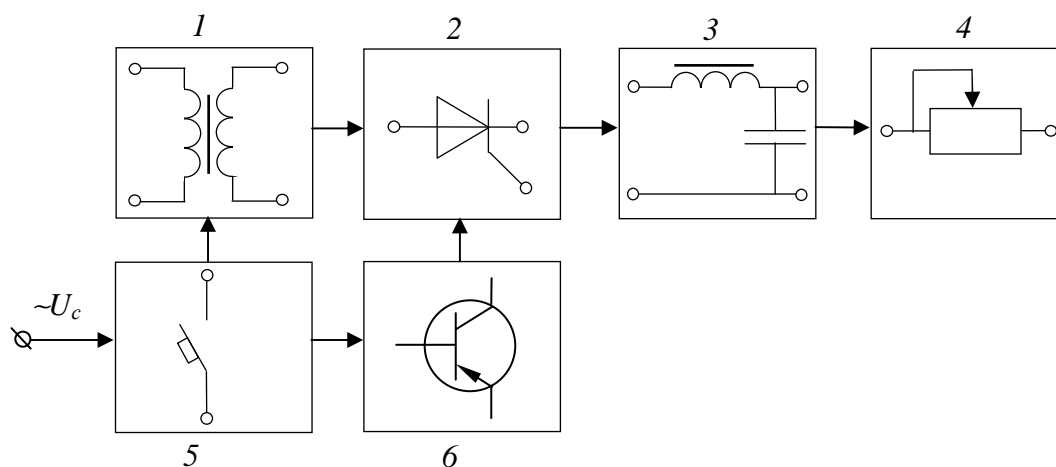


Рисунок 13.8 – Структурная схема выпрямителя

В некоторых случаях в схеме выпрямителя могут отсутствовать отдельные элементы, например фильтр 3 при работе выпрямителя на нагруз-

ку индуктивного характера, или силовой трансформатор I в случае бес- трансформаторного включения выпрямителя.

13.2.1 Выпрямители однофазного тока. Рассмотрим схему *однополупериодного однофазного выпрямителя* (рис. 13.9). В этой схеме трансформатор имеет одну вторичную обмотку, напряжение u_2 которой изменяется по синусоидальному закону $u_2 = U_{\text{макс}2} \sin \omega t$. Ток в цепи нагрузки R_d проходит только в положительные полупериоды (рис. 13.9, б), когда точка a вторичной обмотки, к которой присоединен анод диода VD , имеет положительный потенциал относительно точки b . В отрицательные полупериоды (интервал времени t_1-t_2) к диоду VD прикладывается обратное напряжение, и он будет закрыт.

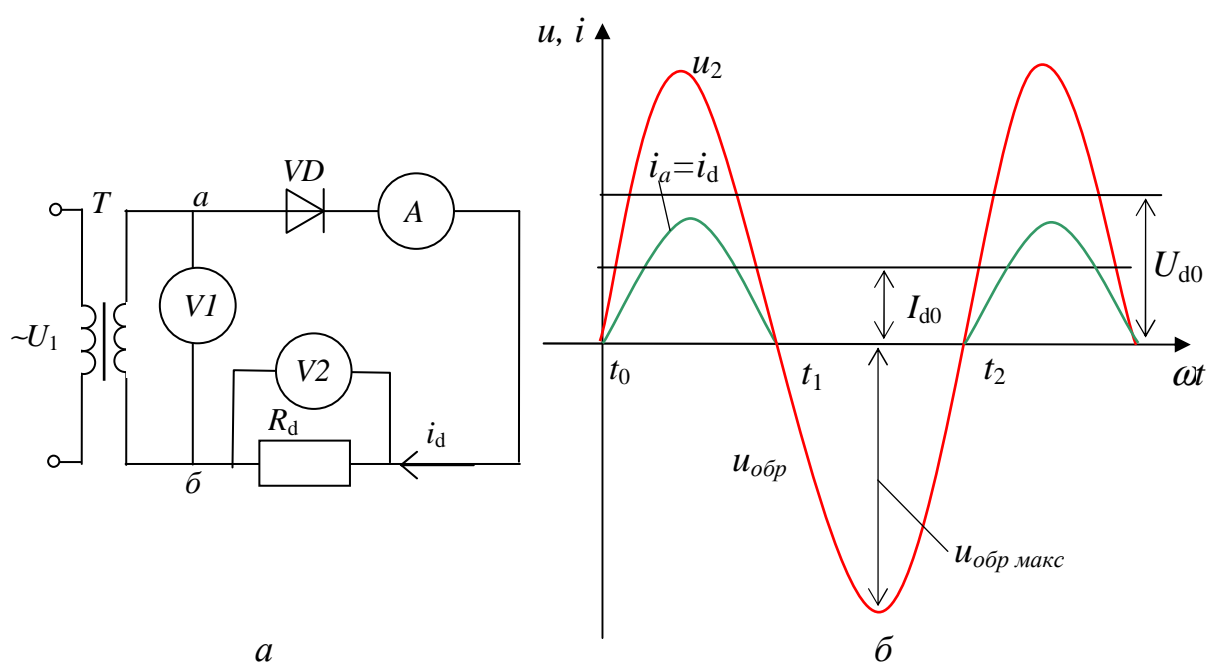


Рисунок 13.9 – Однополупериодный однофазный выпрямитель:
а – схема; б – диаграммы напряжений и токов

Выпрямленное напряжение u_d описывается положительными полуволнами напряжения u_2 вторичной обмотки трансформатора. Среднее за период значение напряжения на нагрузке называется **выпрямленным напряжением** U_d . Ток в нагрузке R_d проходит в одном направлении, но имеет пульсирующий характер и представляет собой выпрямленный ток i_d .

Выпрямленное напряжение u_d и ток i_d содержат постоянную составляющую U_d и I_d и переменную составляющую (пульсации) $U_{d\sim}$ и $I_{d\sim}$. Качественная сторона работы выпрямителя оценивается соотношениями между постоянной составляющей и пульсациями напряжения и тока.

Для однополупериодной схемы справедливы следующие соотношения между напряжениями, токами и мощностями в отдельных элементах выпрямителя.

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d0} = 0,45 \cdot U_2. \quad (13.12)$$

Максимальное значение обратного напряжения, прикладываемое к диоду в непроводящую часть периода:

$$U_{обр. \max} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 3,14 \cdot U_{d0}, \quad (13.13)$$

где U_2 – действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора T .

Среднее значение тока, проходящего через диод и нагрузку,

$$I_a = I_d = U_{d0}/R_d. \quad (13.14)$$

Средняя мощность, отдаваемая в нагрузку, определяется произведением напряжения U_d и тока I_d , т. е. $P_d = U_d \cdot I_d$.

Расчетная (типовая) мощность трансформатора, определяющая его габариты, в 3,09 раза больше мощности в нагрузке R_d :

$$S_{тр} = 3,09 U_d \cdot I_d. \quad (13.15)$$

Таким образом, *расчетная мощность трансформатора, работающего на однополупериодный выпрямитель, больше мощности в нагрузке, так как в его вторичной обмотке проходит несинусоидальный ток, имеющий постоянную и переменные составляющие, а в первичной обмотке, кроме тока основной частоты f_1 - токи высших гармоник*. По отношению к сети питания эти токи являются реактивными и, не создавая полезной мощности, лишь нагревают обмотки трансформатора выпрямителя.

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора определяется соотношением

$$I_2 = 1,57 \cdot I_d. \quad (13.16)$$

Из формулы (13.16) следует, что показания амперметра электромагнитной системы A_2 , включенного в цепь вторичной обмотки трансформатора T (рис. 13.9, а), в 1,57 раза превышают показания магнитоэлектрического амперметра A_d , так как первый измеряет действующее значение тока, а второй - средний ток в цепи нагрузки.

Действующее значение напряжения вторичной обмотки

$$U_2 = 2,22 \cdot U_d. \quad (13.17)$$

Действующее значение тока первичной обмотки с учетом коэффициента трансформации $k_{тр} = w_1/w_2$

$$I_1 = 1,51 \frac{1}{k_{тр}} I_d. \quad (13.18)$$

Рассмотренная схема однополупериодного выпрямителя имеет следующие недостатки: плохое использование трансформатора, большое обратное напряжение на диодах, большой коэффициент пульсации выпрямленного напряжения.

К достоинствам данной схемы можно отнести ее простоту (применяется только один диод) и простоту питающего трансформатора (отсутствие нулевой точки на вторичной обмотке, как у двухполупериодной схемы).

Двухполупериодная однофазная схема состоит из трансформатора, имеющего одну первичную и две последовательно соединенные вторичные обмотки с выводом общей (нулевой) точки этих обмоток (рис. 13.10, а). Коэффициент трансформации $k_{тр}$ определяется отношением U_1/U_2 , где U_2 – напряжение одной вторичной обмотки (фазное напряжение).

Свободные концы вторичных обмоток a и b присоединяются к анодам диодов VD_1 и VD_2 , катоды которых соединяются вместе. Нагрузка R_d включается между катодами диодов (положительный полюс выпрямителя), и нулевым выводом 0 трансформатора (отрицательный полюс выпрямителя).

Диоды в этой схеме, как и вторичные обмотки трансформатора, работают поочередно, пропуская в нагрузку ток при положительных значениях анодных напряжений u_{2a} и u_{2b} (рис. 13.10, б), в качестве которых обычно принимают направления, совпадающие с проводимостями вентиля.

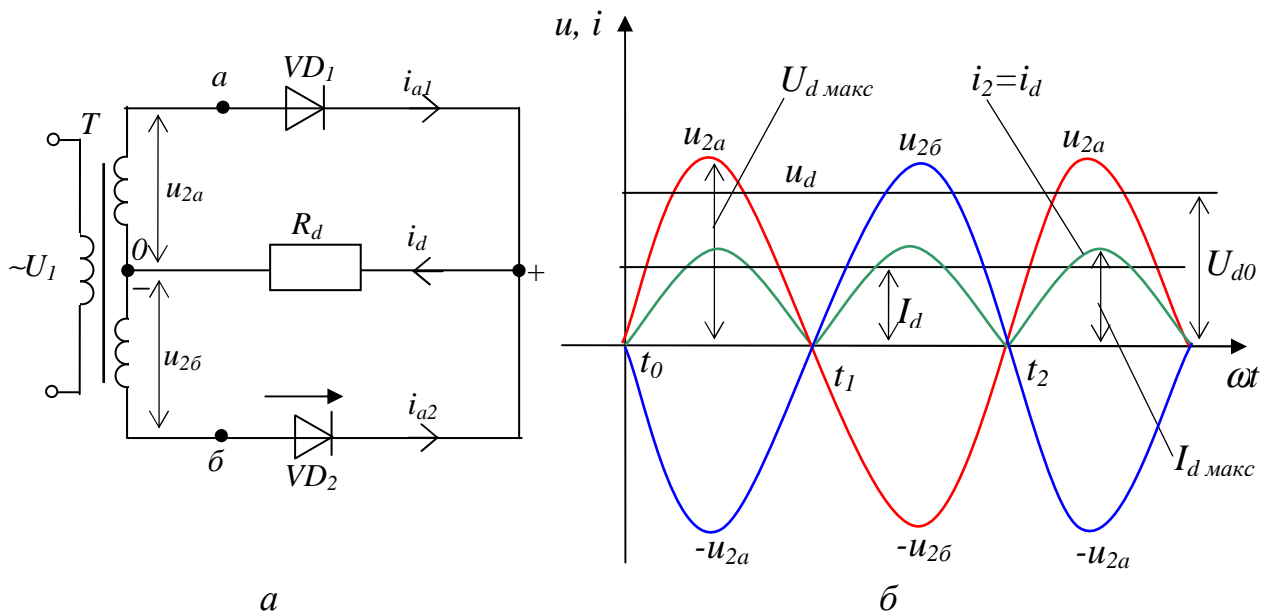


Рисунок 13.10 – Двухполупериодный однофазный выпрямитель:
а – схема; б – диаграммы напряжений и токов

Действительно, при изменении напряжения в точках a и b по закону $u_2 = U_{\max 2} \sin \omega t$ в тот полупериод, когда напряжение в обмотке $0a$ положительно, ток проводит диод VD_1 , анод которого положителен по отношению к катоду, связанному через сопротивление R_d с точкой 0 вто-

ричных обмоток. Анод диода VD_2 , так же как вывод \bar{b} обмотки $0-\bar{b}$, в этот полупериод (t_0-t_1) отрицателен по отношению к нулевому выводу 0 и, следовательно, тока не пропускает.

В следующий полупериод (интервал времени t_1-t_2 на рисунке 13.10, б), когда напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора изменяют свою полярность на обратную, ток будет пропускать диод VD_2 , а диод VD_1 оказывается запертым отрицательным напряжением. Ток в нагрузке R_d все время течет в одном направлении - от катодов диодов к нулевой точке 0 вторичных обмоток трансформатора.

Для данной схемы справедливы следующие соотношения между напряжениями, токами и мощностями в отдельных элементах выпрямителя.

Среднее значение выпрямленного напряжения при идеальных диодах и трансформаторе

$$U_{d0} = 0,9 \cdot U_2. \quad (13.19)$$

Диод, не работающий в отрицательную часть периода, оказывается под воздействием обратного напряжения, равного двойному фазному, так как положительный потенциал вывода a (\bar{b}) вторичной обмотки трансформатора через проводящий диод VD_1 (VD_2) подается к катоду диода VD_2 (VD_1), а анод закрытого диода имеет отрицательный потенциал.

Максимальное значение обратного напряжения равно:

$$U_{обр. \max} = 2\sqrt{2} \cdot U_2 = 3,12 \cdot U_{d0}. \quad (13.20)$$

Среднее значение выпрямленного тока в нагрузке

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{U_2}{1,11 \cdot R_d}. \quad (13.21)$$

Среднее значение тока через каждый диод в 2 раза меньше тока I_d , проходящего через нагрузку, т. е. $I_a = 0,5 \cdot I_d$.

Действующее значение тока диода $I_{a, \text{действ}}$ равно действующему значению тока вторичной обмотки трансформатора I_2 и определяется соотношением

$$I_2 = 0,785 \cdot I_d = 1,57 \cdot I_a. \quad (13.22)$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{d0}. \quad (13.23)$$

Действующее значение тока первичной обмотки с учетом коэффициента трансформации $k_{тр}$ будет равно:

$$I_1 = \sqrt{2} \frac{1}{k_{mp}} I_2 = 1,11 \frac{1}{k_{mp}} I_d. \quad (13.24)$$

Расчетные мощности обмоток трансформатора определяются про-

изведениями действующих значений тока и напряжения:

$$S_2 = 2 \cdot I_2 \cdot U_2 = 2 \cdot 0,785 \cdot I_d \cdot 1,11 \cdot U_{d0} = 1,74 \cdot P_d; \quad (13.25)$$

$$S_1 = I_1 \cdot U_1 = 1,11 \frac{1}{k_{mp}} I_d \cdot 1,11 k_{mp} U_{d0} = 1,23 P_d. \quad (13.26)$$

Расчетная мощность трансформатора:

$$S_{mp} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{1,23 + 1,74}{2} P_d = 1,48 \cdot P_d. \quad (13.27)$$

Частота основной гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения в данной схеме равна двойной частоте сети $2f_1$. Коэффициент пульсации напряжения на выходе выпрямителя равен:

$$q = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = 0,67, \quad (13.28)$$

где m - число фаз выпрямителя, т. е. число полуволн выпрямленного напряжения, приходящееся на один период переменного тока, питающего выпрямитель.

Однофазная мостовая схема состоит из трансформатора Tr с двумя обмотками и четырех диодов VD_1, VD_2, VD_3 и VD_4 , соединенных по схеме моста (рис. 13.11, а). К одной диагонали моста (точки 1, 3) присоединяется вторичная обмотка, в другую (точки 2, 4) - включается нагрузка R_d . Общая точка катодов диодов VD_1 и VD_2 является положительным полюсом выпрямителя, а отрицательным - точка связи анодов диодов VD_3 и VD_4 .

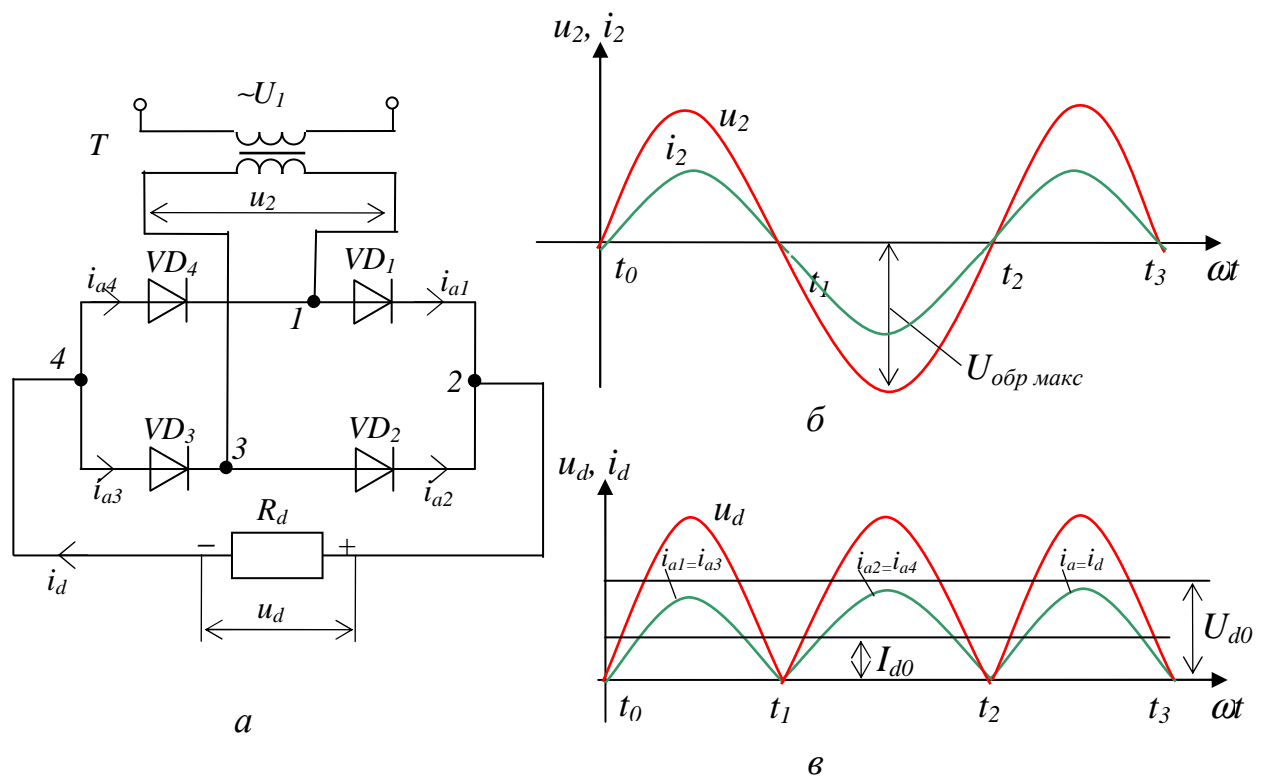


Рисунок 13.11 – Однофазный мостовой выпрямитель:
а – схема; б и в – диаграммы напряжений и токов на элементах схемы

Диоды в этой схеме работают парами поочередно. В положительный полупериод напряжения u_2 проводят ток диоды VD_1 и VD_3 , а к диодам VD_2 и VD_4 прикладывается обратное напряжение, и они закрыты. В отрицательный полупериод напряжения u_2 будут проводить ток диоды VD_2 и VD_4 , а диоды VD_1 и VD_3 выдерживают обратное напряжение.

Ток i_d в нагрузке проходит все время в одном направлении - от соединенных катодов диодов VD_1 и VD_2 к анодам диодов VD_3 и VD_4 . Ток i_2 во вторичной обмотке трансформатора (рис. 13.11, б) меняет свое направление каждые полпериода и будет синусоидальным. Постоянной составляющей тока во вторичной обмотке нет. Следовательно, не будет подмагничивания сердечника трансформатора постоянным магнитным потоком. Ток в первичной обмотке трансформатора также синусоидальный.

Средние значения выпрямленного напряжения U_{d0} и тока I_a через вентиль в этой схеме получаются такими же, как и в схеме с нулевой точкой.

Обратное напряжение, приложенное к закрытым диодам, определяется напряжением u_2 вторичной обмотки трансформатора (рис. 13.11, б), так как неработающие в данный полупериод диоды оказываются присоединенными ко вторичной обмотке трансформатора через два других работающих диода, падением напряжения в которых можно пренебречь, т. е.

$$U_{обр. \max} = \sqrt{2}U_2 = 1,57 \cdot U_{d0}. \quad (13.29)$$

Соотношения между другими величинами для однофазной мостовой схемы приведены в таблице 13.2.

Таблица 13.2 – Соотношения между токами и напряжениями в выпрямителях

Схема выпрямителя	Зависимость U_d от угла регулирования в непрерывном режиме	$U_{d0}/U_{2ф}$	$U_{обр. \max}/U_{d0}$	I_a/I_d	$I_{a.дейст}/I_d$	I_2/I_d	$S_{тр}/P_d$	Коэффициент пульсации, %
Однофазная двухполупериодная (нулевая)	$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha$	0,9	3,14	0,5	0,785	0,785	1,48	67
					0,71	0,71	1,34	
Однофазная мостовая	$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha$	0,9	1,57	0,5	0,785	1,11	1,23	67
					0,71	1,0	1,11	
Трехфазная нулевая	$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha$	1,17	2,09	0,33	0,585	0,585	1,37	25
					0,577	0,577	1,35	
Трехфазная мостовая	$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha$	2,34	1,05	0,33	0,577	0,817	1,05	6

- Примечания: 1. Для неуправляемых выпрямителей $\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$ и $U_d = U_{d0}$.
 2. Для всех схем принято U_2 - фазное напряжение и $X_2 = 0$.
 3. Соотношения для $I_{a.дейст}$, I_2 , $S_{тр}$ указаны при $L_d=0$ (числитель) и $L_d=\infty$ (знаменатель).

Сравним однофазные схемы выпрямления.

Однофазная нулевая схема:

1. Число диодов в 2 раза меньше, чем в однофазной мостовой.
2. Потери мощности в выпрямителе будут меньше, так как в нулевой схеме ток проходит через один диод, а в мостовой - последовательно через два.

Однофазная мостовая схема:

1. Обратное напряжение на диодах в 2 раза меньше, чем в нулевой схеме.
2. Вдвое меньше напряжение (число витков) вторичной обмотки при одинаковом значении U_{d0} .
3. Трансформатор имеет обычное исполнение, так как нет вывода средней точки на вторичной обмотке.
4. Расчетная мощность трансформатора на 25% меньше, чем в нулевой схеме, следовательно, меньше расходуется меди и железа, меньше будут размеры и масса.

Данная схема выпрямителя может работать и без трансформатора, если напряжение сети u_1 подходит по величине для получения необходимого значения $U_{в0}$ и не требуется изоляция цепи выпрямленного тока от сети.

13.2.2 Выпрямители трехфазного тока. По аналогии со схемами однофазного тока для выпрямления трехфазного тока применяются трехфазная схема с нулевой точкой и мостовая схема.

Трехфазная схема выпрямления с нулевой точкой (или трехфазная нулевая схема) показана на рисунке 13.12. К сети трехфазного тока подключен трансформатор T , три первичные обмотки которого могут быть соединены в звезду или треугольник, вторичные обмотки - только в звезду. Свободные концы a, b, c каждой из фаз вторичной обмотки присоединяются к анодам вентилей VD_1, VD_2, VD_3 . Катоды вентилях соединяются вместе и служат положительным полюсом для цепи нагрузки R_d , а нулевая точка O вторичной обмотки трансформатора – отрицательным полюсом.

Из временной диаграммы (см. рис. 13.12, б) видно, что напряжения u_{2a}, u_{2b} и u_{2c} сдвинуты по фазе на $2\pi/3$ (рад) и в течение $1/3$ периода ($1/3T$) напряжение одной фазы выше напряжения двух других фаз относительно нулевой точки трансформатора. Ток через вентиль i_a и связанную с ним вторичную обмотку и нагрузку будет проходить в течение той трети периода, когда напряжение в данной фазе больше, чем в двух других. Работающий вентиль прекращает проводить ток тогда, когда потенциал его анода становится ниже общего потенциала катодов.

Переход тока от одного вентиля к другому (коммутация тока) происходит в момент пересечения кривых фазных напряжений (точки a, b, c и g на рис. 13.12, б). Выпрямленный ток i_d проходит через нагрузку R_d непрерывно (рис. 13.12, в).

Напряжение на выходе выпрямителя u_d в любой момент равно мгновенному значению напряжения той вторичной обмотки, в которой вентиль открыт, и выпрямленное напряжение представляет собой огибающую верхоушек синусоид фазных напряжений $u_{2\phi}$.

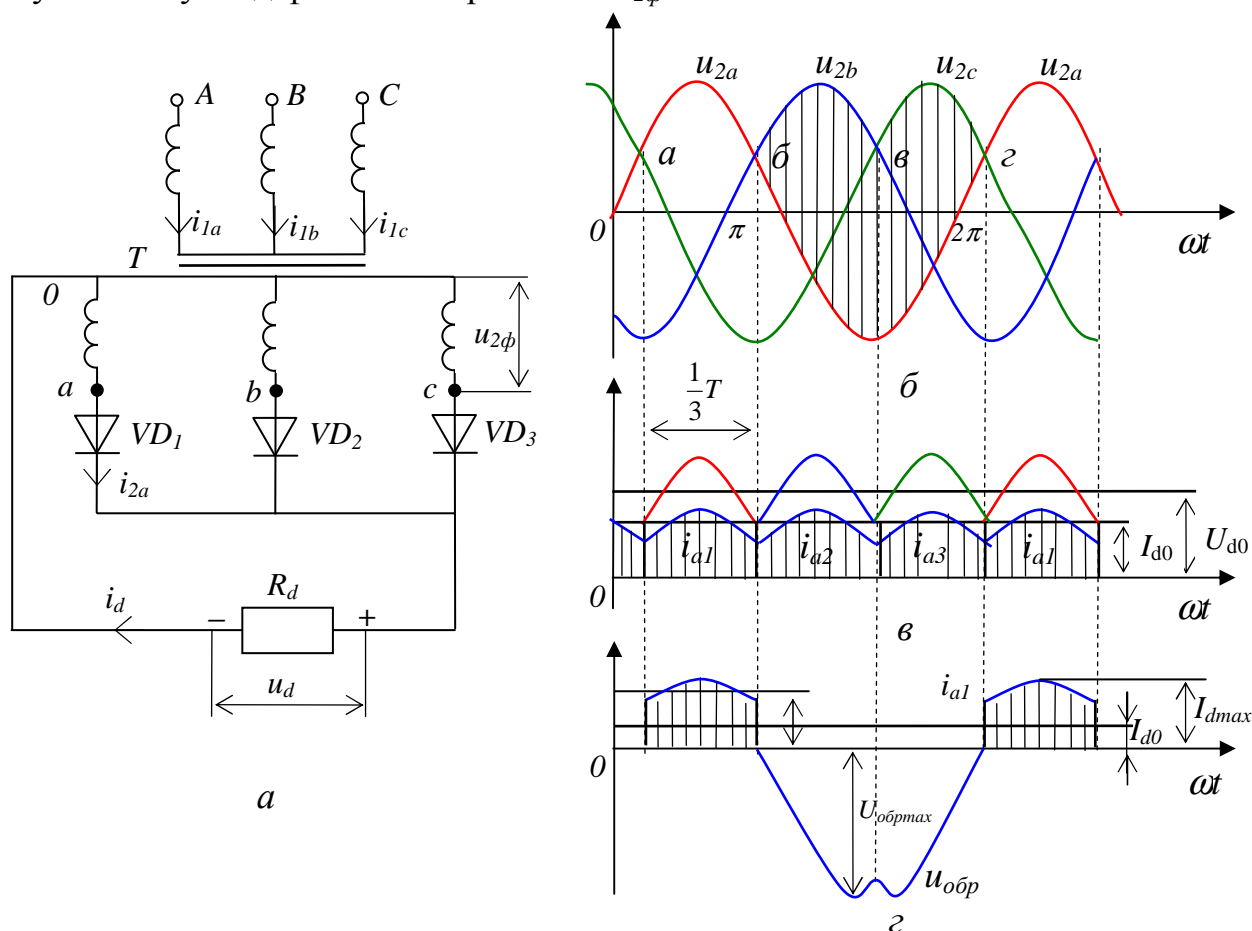


Рисунок 13.12 – Трехфазный выпрямитель с нулевой точкой:
а – схема; б – г – диаграммы напряжений и токов на элементах

При изменении вторичного напряжения по закону $u_{2\phi} = U_{\max 2} \cdot \sin \omega t$ ток каждой из фаз будет являться синусоидальной функцией

$$i_2 = \frac{u_2}{R_d} = \frac{U_{\max 2}}{R} \sin \omega t. \quad (13.30)$$

Следовательно, анодный ток i_a будет иметь форму прямоугольника с основанием $2\pi/3$, ограниченного сверху отрезком синусоиды. На рисунке 13.12, г изображен ток фазы а, токи фаз b и c изображаются подобными кривыми, сдвинутыми на $2\pi/3$ относительно друг друга.

Для трехфазной нулевой схемы выпрямления характерны следующие соотношения между напряжениями, токами и мощностями в отдельных элементах выпрямителя.

Среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе

$$U_{d0} = 1,17 U_{2\phi}. \quad (13.31)$$

Выпрямленное напряжение содержит постоянную составляющую U_d и наложенную на нее переменную составляющую $U_{d\sim}$, имеющую трехкратную частоту по отношению к частоте сети. Коэффициент пульсаций напряжения на выходе выпрямителя

$$q = 2/(m^2 - 1) = 2/(3^2 - 1) = 0,25. \quad (13.32)$$

Обратное напряжение $u_{обр}$, приложенное к неработающему вентилю, равно междофазному напряжению вторичных обмоток трансформатора, так как анод закрытого вентиля присоединен к одной из фаз, а катод через работающий вентиль присоединен к другой фазе вторичной обмотки. На рисунке 13.12, z показана кривая обратного напряжения $u_{обр}$ между анодом и катодом вентиля VD_1 .

Максимальное значение $u_{обр}$ равно амплитуде междофазного (линейного) напряжения вторичной обмотки трансформатора T :

$$U_{обр. \max} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{2\phi} = 2,09 \cdot U_{d0}. \quad (13.33)$$

Ток в нагрузке равен отношению выпрямленного напряжения к сопротивлению нагрузки, т. е. $i_d = u_d/R_d$. Среднее значение выпрямленного тока в нагрузке

$$I_d = \frac{U_{d0}}{R_d} = 1,17 \frac{U_{2\phi}}{R_d}. \quad (13.34)$$

Каждый вентиль в данной схеме работает один раз за период в течение $1/3T$. Следовательно, среднее значение тока через вентиль в 3 раза меньше тока нагрузки, т. е. $I_a = 1/3 \cdot I_d$.

Действующее значение токов во вторичной обмотке I_2 и вентиля $I_{2, \text{действ}}$ определяется формулой

$$I_2 = I_{2, \text{действ}} = \sqrt{3} \cdot I_a = 0,585 \cdot I_d. \quad (13.35)$$

При одинаковом числе фаз первичной и вторичной обмоток трансформатора T ($m_1 = m_2$) и одинаковых схемах соединения обмоток (звезда-звезда) действующее значение первичного фазного тока I_1 меньше приведенного значения тока I_2' , так как в кривой тока первичной обмотки отсутствует постоянная составляющая, которая не трансформируется, т. е.

$$I_1 = \frac{1}{k_{mp}} \sqrt{I_2'^2 - I_a^2} \approx \frac{1}{k_{mp}} 0,47 I_d. \quad (13.36)$$

Поочередное прохождение однонаправленных токов по вторичным обмоткам трансформатора, которые не полностью компенсируются токами первичной обмотки, создает во всех трех сердечниках поток Φ_0 одного направления. Значение потока Φ_0 изменяется с тройной частотой в соответствии с пульсацией анодного тока. Поток Φ_0 замыкается через воздух и кожух трансформатора. Наличие потока однофазного или вынужденного намагничивания Φ_0 в сердечниках приводит к увеличению намагничивающего тока трансформатора, а также к необходимости увеличения сечения сердечника во избежание его насыщения.

Типовая мощность трансформатора при соединении вторичных обмоток в звезду без учета повышения массы магнитной системы, вызванного наличием потока Φ_0 , равна:

$$S_{mp} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{3U_{1\phi}I_1}{2} = 1,35P_d. \quad (13.37)$$

Трехфазная мостовая схема показана на рисунке 13.13. Выпрямитель в данной схеме состоит из трансформатора, первичные и вторичные обмотки которого соединяются в звезду или треугольник, и шести вентилей, которые могут быть разбиты на две группы:

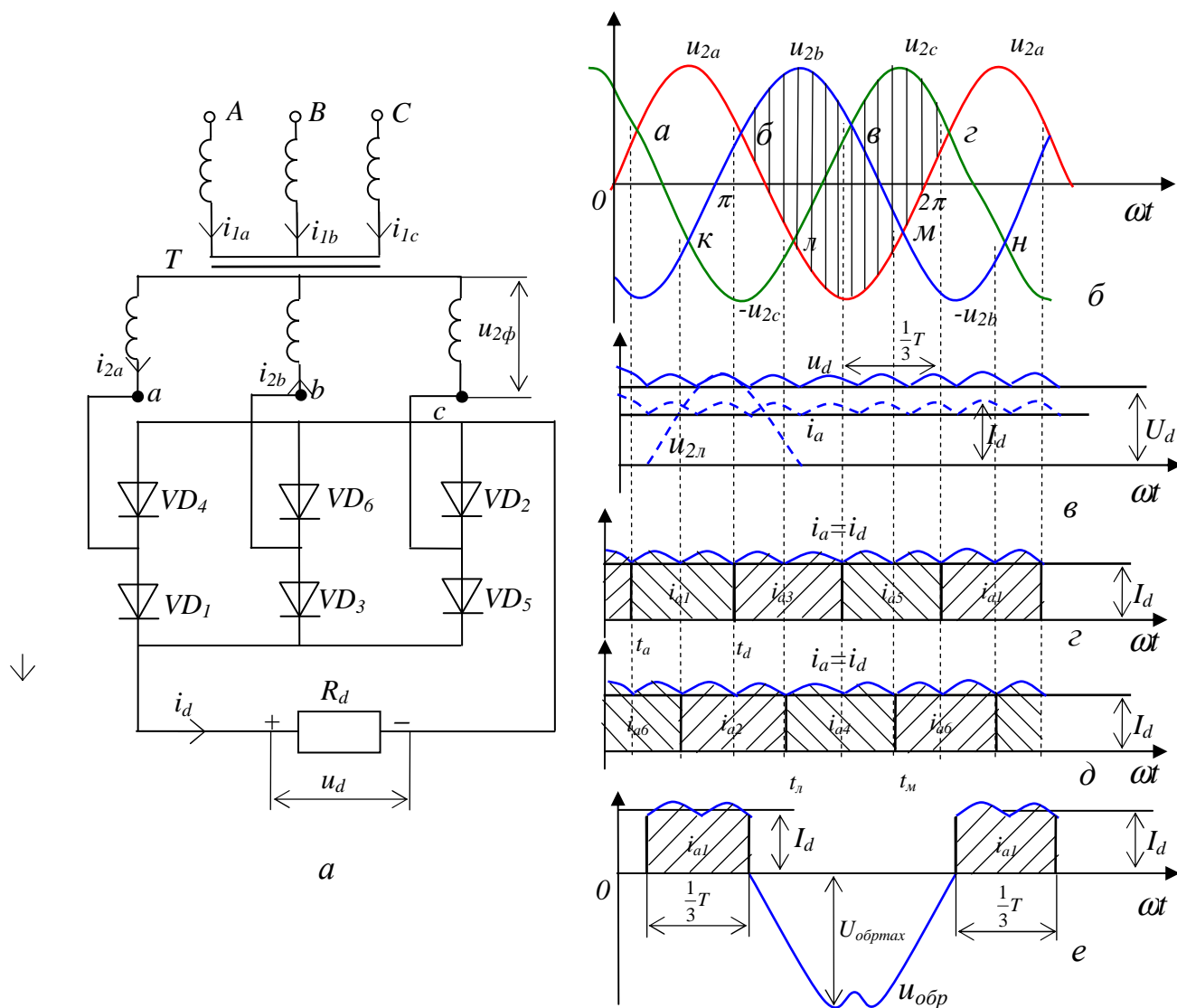


Рисунок 13.13 – Трехфазная мостовая схема выпрямителя:
 а – соединение элементов; б – е – диаграммы напряжений и токов

1) катодную или нечетную (вентили VD_1 , VD_3 и VD_5), в которой электрически связаны катоды вентилей и общий вывод их является положительным полюсом для внешней цепи, а аноды присоединены к выводам вторичных обмоток трансформатора;

2) анодную или четную (вентили VD_2 , VD_4 и VD_5), в которой электрически связаны между собой аноды вентилях, а катоды соединяются с анодами первой группы. Общая точка связи анодов является отрицательным полюсом для внешней цепи.

Катодная группа вентилях повторяет режим работы трехфазной нулевой схемы. В этой группе вентилях в течение каждой трети периода работает вентиль с наиболее высоким потенциалом анода (см. рис. 13.13, б). В анодной группе в данную часть периода работает тот вентиль, у которого катод имеет наиболее отрицательный потенциал по отношению к общей точке анодов.

Вентили катодной группы открываются в момент пересечения положительных участков синусоид (см. точки a , b , v и z на рис. 13.13, б), а вентили анодной группы – в момент пересечения отрицательных участков синусоид (точки k , l , m и n). Каждый из вентилях работает в течение одной трети периода (см. рис. 13.13, e).

При мгновенной коммутации тока в трехфазной мостовой схеме в любой момент времени проводят ток два вентиля – один из катодной, другой из анодной группы, при этом любой вентиль одной группы работает поочередно с двумя вентилями другой группы, соединенными с разными фазами вторичной обмотки (рис. 13.13, z и d). Через каждую фазу трансформатора ток i_2 будет проходить в течение $2/3$ периода: $1/3$ периода – положительный и $1/3$ – отрицательный. Ток i_d в нагрузке все время проходит в одном направлении.

В течение рабочего интервала одновременно проходят токи во вторичных обмотках, расположенных на разных стержнях магнитной системы (см. токи i_{a2} и i_{b2} на рис. 13.13, а), при этом через две первичные обмотки, расположенные на тех же стержнях, также проходят токи. Намагничивающие силы от токов i_1 и i_2 на каждом из стержней в этом случае уравниваются, и однонаправленный поток Φ_0 не возникает.

Выпрямленное напряжение u_d в этой схеме описывается верхней частью кривых междофазных (линейных) напряжений $u_{2л}$ (пунктирная кривая на рис. 13.13, в). Частота пульсаций кривой u_d равна $6f_1$, коэффициент пульсаций напряжения на выходе выпрямителя равен:

$$q = \frac{U_{\max}}{U_{d0}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057. \quad (13.32)$$

Обратное напряжение на закрытом вентиле определяется разностью потенциалов его катода и анода. Ординаты кривой $u_{обр}$ для вентиля VD_1 показаны на рисунке 13.13, б штриховкой, а на рисунке 13.13, e кривая $u_{обр}$ изображена полностью.

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле в трехфазной мостовой схеме равно амплитуде линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Выпрямленный ток i_d при работе на чисто активную нагрузку полностью повторяет кривую u_d (см. пунктирную кривую на рис. 13.13, в).

Соотношения между напряжениями и токами в трехфазной мостовой схеме приведены в таблице 13.2.

Произведем сравнение достоинств трехфазных схем выпрямления при одинаковых значениях мощности P_d , напряжения U_d , отсутствии параллельного и последовательного соединения вентилях в плечах выпрямителя.

Трехфазная схема с нулевой точкой:

1. Схема простая. Число вентилях в 2 раза меньше, чем в мостовой или двойной трехфазной схемах.

2. Меньше потери в вентилях, так как в данной схеме ток проходит через один диод, а в мостовой последовательно через два диода.

Трехфазная мостовая схема:

1. Обратное напряжение, прикладываемое к вентилям, в 2 раза меньше, чем в схемах с нулем и уравнильным реактором.

2. Вдвое меньше напряжение (число витков) вторичной обмотки, но сечение провода в $\sqrt{2}$ раз больше.

3. Нет вынужденного намагничивания сердечника. Нормальное исполнение обмоток трансформатора.

4. Габаритная мощность трансформатора на 30% меньше, чем в схеме с нулем, и на 26% меньше, чем в схеме с уравнильным реактором, ток первичной обмотки имеет форму синусоиды.

При применении полупроводниковых вентилях преимущества имеет мостовая схема, которая может работать непосредственно от сети, если напряжение U_1 подходит по величине для получения нужного значения U_d и не требуется изоляция от питающей сети цепи выпрямленного тока.

13.2.3 Управляемые выпрямители. Во многих практических случаях выпрямители должны обеспечивать возможность плавного регулирования среднего значения выпрямленного напряжения U_d , например для регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока, при зарядке аккумуляторных батарей и т. д.

При использовании в выпрямителях неуправляемых диодов среднее значение выпрямленного напряжения U_d , как это видно из выражений (13.19), (13.31) и таблицы 13.2, пропорционально напряжению $U_{2ф}$. Поэтому регулирование U_d в этом случае возможно только за счет изменения напряжения вторичной обмотки трансформатора, что не всегда удобно.

Более широкие возможности для регулирования выпрямленного напряжения дает применение в схемах выпрямления управляемых диодов – тиристоров.

Принцип действия управляемого выпрямителя. На рисунке 13.14, а изображена однофазная нулевая схема управляемого выпрямителя, кото-

рая отличается от схемы на рисунке 13.10, а тем, что неуправляемые диоды VD_1 и VD_2 заменены тиристорами VS_1 и VS_2 . Аноды тиристоров присоединены к выводам вторичной обмотки, а управляющие электроды связаны с системой управления СУ, которая формирует синхронно с напряжением сети управляющие импульсы напряжения U_{y1} и U_{y2} и позволяет изменять их фазу относительно фазных напряжений u_{2a} и u_{2b} источника питания.

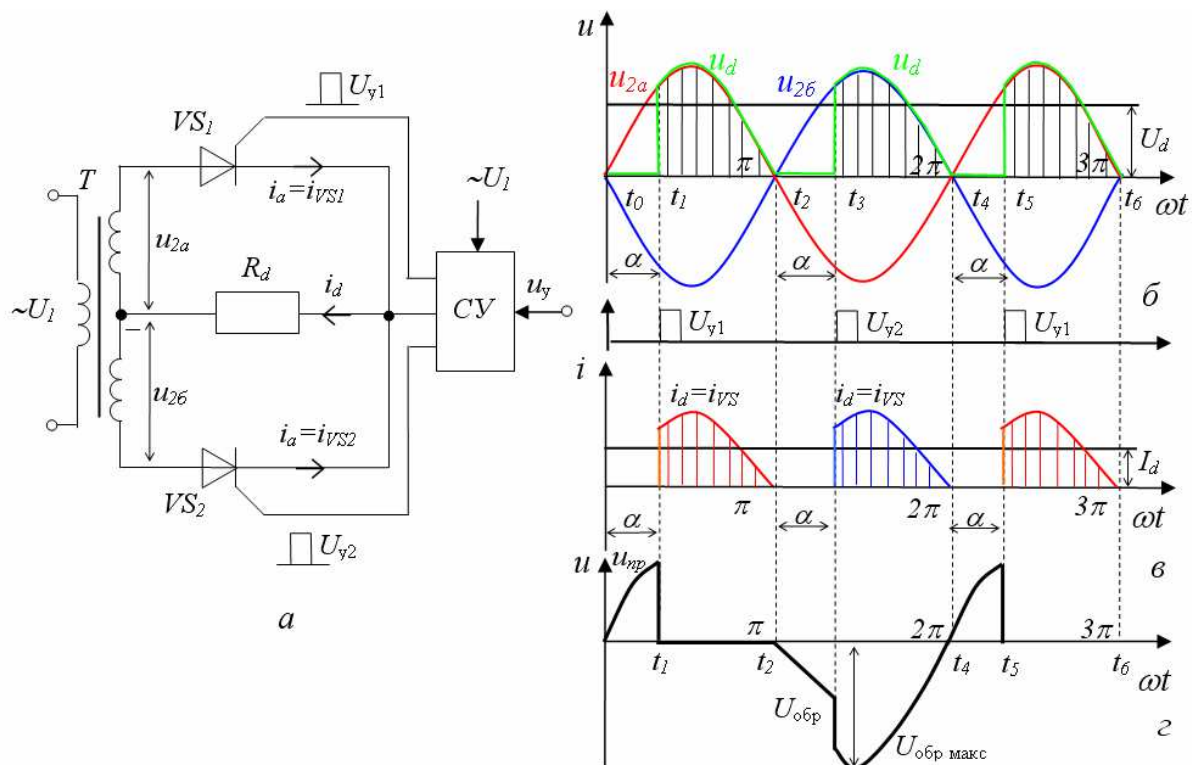


Рисунок 13.14 – Однофазный управляемый двухполупериодный выпрямитель: а – схема; б–г – диаграммы напряжений и токов в элементах

При использовании в схеме неуправляемых диодов диод VD_1 открылся бы в момент времени t_0 (рис. 13.14, б), который является моментом естественного отпирания диода. Тиристор, как отмечалось в подразделе 13.3.1, отпирается при наличии положительного напряжения на аноде и отпирающего импульса на управляющем электроде. Предположим, что на управляющий электрод тиристора VS_1 отпирающий импульс U_{y1} будет подан в момент t_1 , следовательно, он откроется с некоторой задержкой по отношению к началу положительного напряжения u_{2a} , в результате чего в интервале t_0-t_1 напряжение на нагрузке R_d будет равно нулю, так как оба тиристора VS_1 и VS_2 закрыты.

Угол задержки, отсчитываемый от момента естественного отпирания диода, выраженный в электрических градусах, называется **углом управления** и обозначается греческой буквой α . В момент отпирания тиристора VS_1 напряжение u_d на нагрузке R_d скачком возрастает и далее изменяется по кривой фазного напряжения u_{2a} . В момент t_2 напряжение u_{2a} меняет знак, тиристор VS_1 запирается, в интервале t_2-t_3 оба тиристора будут закрыты, и ток i_d в нагрузке отсутствует, а в момент t_3

вступает в работу тиристор VS_2 и остается открытым до момента t_4 . Далее через интервал, равный углу α , вновь вступит в работу тиристор VS_1 и т. д.

При работе выпрямителя на активную нагрузку кривая выпрямленного тока i_d полностью повторяет форму кривой напряжения u_d (рис. 13.14, б и в). На рисунке 13.14, г построена кривая обратного напряжения $u_{обр}$ на тиристоре VS_1 для случая работы схемы с углом регулирования $\alpha = 60^\circ$. В интервале t_0-t_2 к тиристору VS_1 приложено прямое напряжение $u_{пр} = u_{2a}$, в интервале t_1-t_2 тиристор VS_1 открыт, и падение напряжения на нем практически равно нулю. В момент t_2 , когда ток i_d равен нулю, тиристор VS_1 закрывается, и к нему прикладывается обратное напряжение, равное фазному $-u_{2a}$, поскольку тиристор VS_2 также закрыт. В момент $t_3 = \pi + \alpha$ открывается тиристор VS_2 , и к тиристору VS_1 прикладывается междофазное напряжение вторичной обмотки трансформатора, которое будет действовать на нем до момента $t_4 = 2\pi$, когда тиристор VS_2 закроется. В дальнейшем процессы в схеме будут повторяться через каждый период.

Очевидно, что если изменять угол α (сдвигать по фазе управляющие импульсы U_v относительно напряжения на анодах тиристоров), то будет изменяться время работы тиристоров и соответственно величина выпрямленного напряжения, среднее значение которого будет определяться выражением

$$U_d = U_{d0} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (13.33)$$

где U_{d0} – наибольшее значение выпрямленного напряжения при полностью открытых ($\alpha = 0$) тиристорах VS_1 и VS_2 может быть подсчитано по формуле (13.19).

При работе выпрямителя на активную нагрузку и регулировании выпрямленного напряжения от 0 до U_{d0} , как видно из формулы (13.33), угол регулирования α необходимо изменять от $\alpha_{\max} = 180^\circ$ до $\alpha_{\min} = 0$. Действительно, если $\alpha = 180^\circ$, то $\cos 180^\circ = -1$ и $U_d = 0$; при $\alpha = 0$ $\cos 0 = 1$ и $U_d = U_{d0} = 0,9 \cdot U_{2\phi}$.

Следовательно, рабочий режим неуправляемого выпрямителя является предельным, к которому приближается управляемый выпрямитель при угле управления $\alpha = 0$.

В отличие от неуправляемого выпрямителя, диоды которого выдерживают только обратное напряжение, диоды управляемого преобразователя должны выдерживать как прямое, так и обратное напряжение. При активной нагрузке максимальное значение обратного напряжения на закрытом в данный полупериод тиристоре при углах $\alpha < 90^\circ$ равно амплитуде напряжения всей вторичной обмотки трансформатора и (как в неуправляемой схеме) определяется выражением (13.20).

Значение прямого напряжения $U_{\text{пр}}$ на закрытом тиристоре при $\alpha < 90^\circ$ зависит от угла регулирования следующим образом:

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{2} \sin \alpha. \quad (13.34)$$

При $\alpha = 90^\circ$ значение $U_{\text{пр}}$ достигает максимума. Среднее значение выпрямленного тока определяется как $I_d = U_d/R_d$, где U_d можно вычислить по формуле (13.33). При угле регулирования $\alpha = 0$ в нагрузке будет наибольший ток $I_d = U_{d0}/R_d$.

Среднее значение тока через тиристор $I_{a,\text{ср}} = 0,5 I_d$, действующее значение тока тиристора $I_{a,\text{дейст}}$ и вторичной обмотки трансформатора I_2 , а также тока его первичной обмотки I_1 при $\alpha = 0$ определяются соответственно по формулам (13.22) и (13.24). Количественные соотношения между другими величинами для однофазной нулевой схемы на управляемых вентилях приведены в таблице 13.2.

Работа однофазной мостовой схемы на тиристорах отличается от работы однофазной нулевой схемы выпрямления на диодах тем, что управляющие импульсы должны подаваться одновременно на два тиристора, расположенные в противоположных плечах выпрямительного моста.

Кривые выпрямленного напряжения u_d и выпрямленного тока I_d однофазной мостовой схемы на тиристорах аналогичны соответствующим кривым для однофазной нулевой схемы на диодах. Количественные соотношения для токов и напряжений схемы приведены в таблице 13.2.

В трехфазной нулевой схеме с тиристорами (рис. 13.15, а) управляющие импульсы подаются на них с некоторым смещением во времени по отношению к моменту естественного отпирания диодов в неуправляемой схеме, которое соответствует точкам пересечения синусоид фазных напряжений (точки а, б, в и г на рис. 13.15, б).

Пусть, например, управляющие импульсы на тиристоры VS_1, VS_2, VS_3 подаются в моменты, соответствующие середине положительных полуволн фазных напряжений (это соответствует углу $\alpha = 60^\circ$). В этом случае на нагрузке возникают импульсы выпрямленного напряжения u_d в форме четверти синусоиды (рис. 13.15, в).

Изменение фазы (смещение) управляющих импульсов в сторону увеличения или уменьшения угла управления α вызывает соответствующее уменьшение (рис. 13.15, б) или увеличение (рис. 13.15, г) импульсов напряжения u_d . При угле $\alpha = 0$ кривая выпрямленного напряжения (рис. 13.15, д) будет иметь такую же форму, как в неуправляемом выпрямителе (рис. 13.12, б). Очевидно, что кривая тока i_d по своей форме будет повторять кривую выпрямленного напряжения u_d при работе выпрямителя на активную нагрузку.

Из этих кривых видно, что имеются две характерные области работы управляемого выпрямителя. Первая соответствует изменению угла регулирования в пределах $0 < \alpha < 30^\circ$, при этом выпрямленный ток будет непре-

рывным, и среднее значение выпрямленного напряжения определяется выражением

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha. \quad (13.35)$$

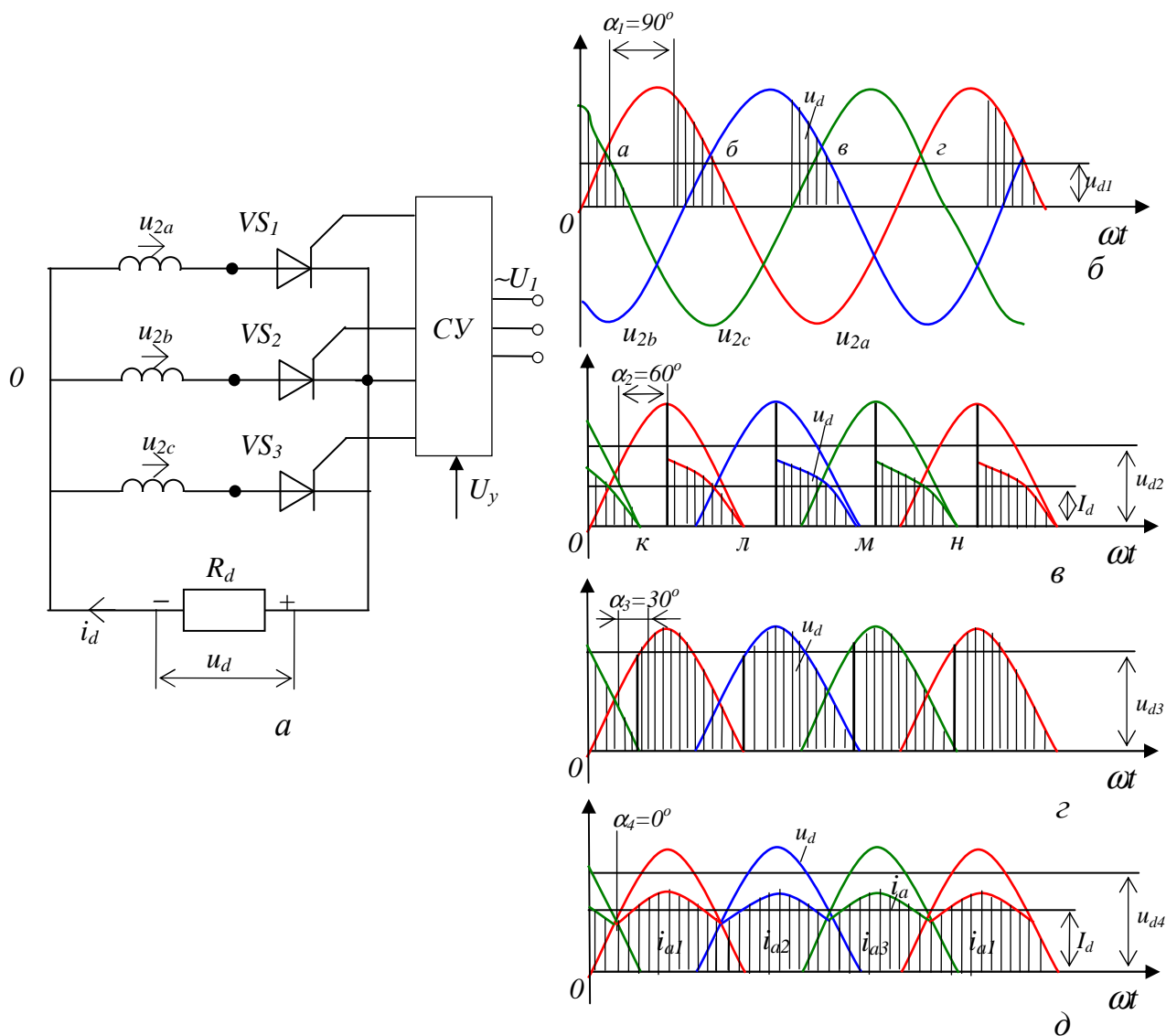


Рисунок 13.15 – Трехфазный управляемый тиристорный выпрямитель с нулевой точкой: *а* – схема; *б–д* – диаграммы напряжений и токов в элементах

Каждый тиристор схемы в этом случае работает одну треть периода. Вторая область соответствует углам $\alpha > 30^\circ$ и характеризуется тем, что при прохождении фазных напряжений через нуль (точки *к*, *л*, *м*, *н* на рис. 13.15, *в*) работающий тиристор закрывается, а так как на очередной вступающий в работу тиристор отпирающий импульс еще не подан, то в кривой выпрямленного напряжения возникают паузы (нулевые участки), в течение которых ток $i_d = 0$.

Длительность прохождения тока через вентиль в этом случае будет меньше $1/3 \cdot T$, и среднее значение выпрямленного напряжения рассчитывается по формуле

$$U_d = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{d0} [1 + \cos(30^\circ + \alpha)]. \quad (13.36)$$

Для трехфазной нулевой схемы при работе на активную нагрузку предельным углом регулирования, при котором $U_d = 0$, является угол $\alpha_{\max} = 150^\circ$. Напряжение на вентиле определяется разностью потенциалов анода и общей точки катодов, потенциал которой изменяется по кривой напряжения u_d . Максимальное значение обратного напряжения на тиристоре, так же как в схеме с неуправляемыми вентилями, равно амплитуде напряжения $u_{2л}$ (13.33).

В трехфазной мостовой схеме с тиристорами (рис. 13.16, а), так же как и с неуправляемыми диодами, одновременно работают два тиристора: один из катодной (нечетной) группы, другой из анодной (четной) группы, и нагрузка в любой момент времени присоединяется к двум фазам вторичной обмотки трансформатора. Отпирающие импульсы на тиристоры нечетной группы подаются с опережением на 180° по отношению к тиристорам четной группы, присоединенным к тем же выводам вторичной обмотки, так как первые работают при положительных значениях фазных напряжений на анодах, вторые – при отрицательных на катодах.

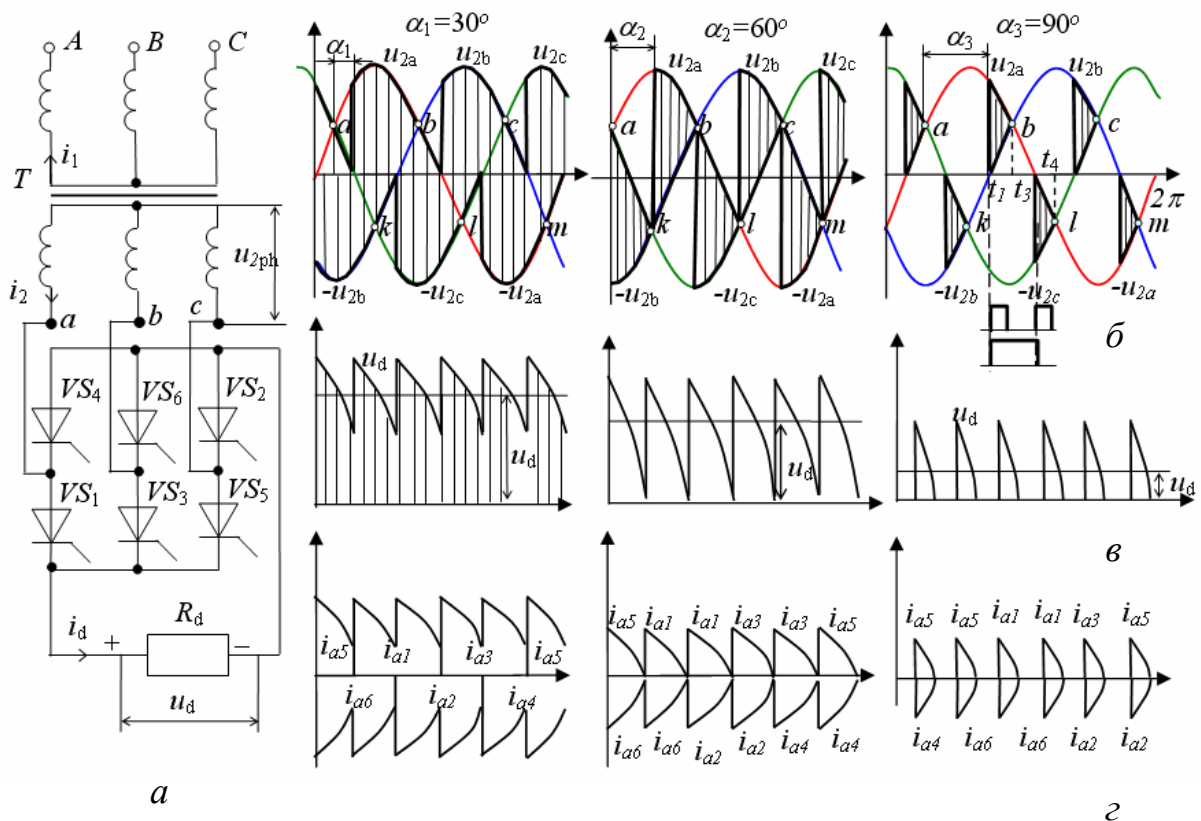


Рисунок 13.16 – Трехфазная мостовая схема:
а – схема; б–г – диаграммы напряжений и токов в элементах

Работа рассматриваемой схемы выпрямления иллюстрируется диаграммами мгновенных значений фазных напряжений на тиристорах (рис. 13.16, б); кривыми выпрямленного напряжения u_d (рис. 13.16, в), которое получается путем суммирования мгновенных значений напряжений работающих в данный момент тиристоров, кривыми анодных токов (рис. 13.16, г) катодной группы – над осью времени, анодной группы – под осью. Каждая из диаграмм построена для трех значений углов регулирования: $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$ и $\alpha_3 = 90^\circ$.

При угле регулирования $\alpha = 0$ отпирающие импульсы на тиристоры необходимо подавать в моменты, соответствующие точкам пересечения кривых фазных напряжений (точки а, б, в и к, л, м на рис. 13.16, б). В этом случае каждый из тиристоров проводит ток в течение $1/3$ периода, как в неуправляемой схеме, а чередование пар работающих тиристоров происходит через 60° (рис. 13.16, в).

Пока угол регулирования $\alpha \ll 60^\circ$, кривые выпрямленного напряжения, а следовательно, и кривые выпрямленного тока (рис. 13.16, в и г) при активной нагрузке непрерывны. Для этого режима ($0 \ll \alpha \ll 60^\circ$) среднее значение выпрямленного напряжения определяется выражением (13.35). Как видно из рисунка 13.16, г, через вступающий в работу тиристор ток может проходить только при условии, если одновременно открывается или уже открыт соответствующий (смежный по порядковому номеру) тиристор другого плеча моста. В противном случае цепь тока не будет замкнута и очередной вступающий в работу тиристор не откроется.

При пуске выпрямителя с нуля ($U_d = 0$) или при переходе его в режим прерывистых токов ($\alpha > 60^\circ$) возможно нарушение указанного выше условия. Поэтому на управляющие электроды тиристоров в трехфазной мостовой схеме выпрямления необходимо подавать импульсы шириной больше 60° или два узких импульса с интервалом между ними в 60° (рис. 13.16, б, при $\alpha_3 = 90^\circ$).

Схема управления выпрямителем должна быть построена так, чтобы при подаче отпирающего импульса на вступающий в работу тиристор одного плеча моста одновременно осуществлялась бы подача импульса на управляющий электрод тиристора отстающей фазы противоположного плеча моста. Например, при работе выпрямителя с $\alpha = 90^\circ$ (рис. 13.16, б) для того чтобы открыть тиристор VS_1 в момент t_1 необходимо одновременно подать отпирающий импульс и на тиристор VS_2 , после чего оба вентиля будут проводить ток до момента t_2 , когда разность мгновенных значений напряжений u_{2d} и u_2 будет равна нулю, и тиристоры VS_1 и VS_2 закроются. Затем в момент t_3 должен вступить в работу тиристор VS_3 , который откроется только при условии наличия повторного отпирающего импульса на тиристоре VS_3 или при условии, что на управляющий электрод этого тиристора в момент t_1 будет подан импульс длительностью больше 60° . Тири-

сторы VS_2 и VS_1 будут проводить ток до момента t_4 , далее вступит в работу следующая пара тиристоров VS_3 и VS_2 и т. д.

Среднее значение выпрямленного напряжения, когда ток i_d прерывистый ($\alpha > 60^\circ$), определяется выражением

$$U_d = U_{d0} [1 + \cos(60^\circ + \alpha)]. \quad (13.37)$$

Из формулы (13.37) следует, что при работе данной схемы на активную нагрузку предельным углом регулирования, при котором $u_d = 0$, является угол $\alpha_{\text{макс}} = 120^\circ$.

13.3 Сглаживающие фильтры

Наличие пульсаций выпрямленного напряжения ухудшает работу потребителей, питаемых от выпрямителей. Например, при питании двигателей постоянного тока пульсирующим напряжением ухудшаются условия коммутации тока и увеличиваются потери в двигателе. При питании радиоаппаратуры пульсации напряжения u_d резко ухудшают работу устройств, создавая на выходе усилителей фон, т. е. дополнительные колебания выходного напряжения низкой частоты. Вследствие этого пульсации напряжения на нагрузке должны быть снижены до значений, при которых не сказывалось бы их отрицательное влияние на работу установок.

Для уменьшения пульсации напряжения у потребителя на выходе выпрямителя устанавливается специальное устройство, называемое **сглаживающим фильтром**. Схема включения фильтра Φ приведена на рисунке 13.17, а.

Значение пульсации напряжения на выходе выпрямителя оценивается коэффициентом пульсаций q , который равен отношению амплитуды основной (первой) гармоники пульсаций $U_{\sim 1}$ к постоянной составляющей выпрямленного напряжения U_d , т. е. $q = U_{\sim 1} / U_d$.

Пульсация напряжения на нагрузке характеризуется коэффициентом q_1 , который равен отношению амплитуды основной гармоники пульсаций $U_{d\sim}$ на нагрузке (после фильтра) к выпрямленному напряжению $U_{dн}$ на нагрузке, т. е. $q_1 = U_{d\sim} / U_{dн}$.

Пульсация напряжения на нагрузке задается условиями работы потребителя, а пульсация напряжения на входе выпрямителя известна после выбора схемы выпрямления и определения ее параметров. *Отношение значений q и q_1 определяет степень сглаживания выпрямленного напряжения и называется коэффициентом сглаживания фильтра s :*

$$s = \frac{q}{q_1} = \frac{U_{\sim 1}}{U_d} : \frac{U_{d\sim}}{U_{dн}}. \quad (13.38)$$

Наряду с ослаблением переменной составляющей выпрямленного напряжения сглаживающий фильтр уменьшает и постоянную составляющую

($U_{dH} = U_d - \Delta U_\Phi$). Очевидно, чем меньше степень уменьшения постоянной составляющей (U_d/U_{dH}) при неизменном ослаблении переменной ($U_{d\sim}/U_{\sim 1}$), тем качественнее будет фильтр. Для фильтров выпрямителей малой мощности отношение постоянных составляющих напряжений обычно составляет $U_d/U_{dH} = 1,05\text{--}1,1$, а для выпрямителей большой мощности - $U_d/U_{dH} = 1,005\text{--}1,01$.

В практических расчетах можно считать $U_d \approx U_{dH}$, и коэффициент сглаживания, показывающий в этом случае степень ослабления переменной составляющей выпрямленного напряжения фильтром, принимать равным $s=q/q_1 \approx U_{\sim 1}/U_{d\sim}$.

Рассмотрим основные виды сглаживающих фильтров.

Емкостный фильтр (рис. 13.17, б) представляет собой конденсатор C_Φ , включаемый параллельно нагрузочному сопротивлению R_d . Шунтируя нагрузку малым емкостным сопротивлением $x_c = 1/\omega C \ll R_d$ для переменной составляющей тока $i_d = i_c$, он создает в выпрямителе дополнительное падение напряжения ΔU_a на R_a (рис. 13.17, в), что приводит к сглаживанию напряжения U_d . В этом случае можно считать, что через R_d проходит только постоянная составляющая тока I_d , а переменная составляющая тока $i_{d\sim}$ проходит целиком через конденсатор.

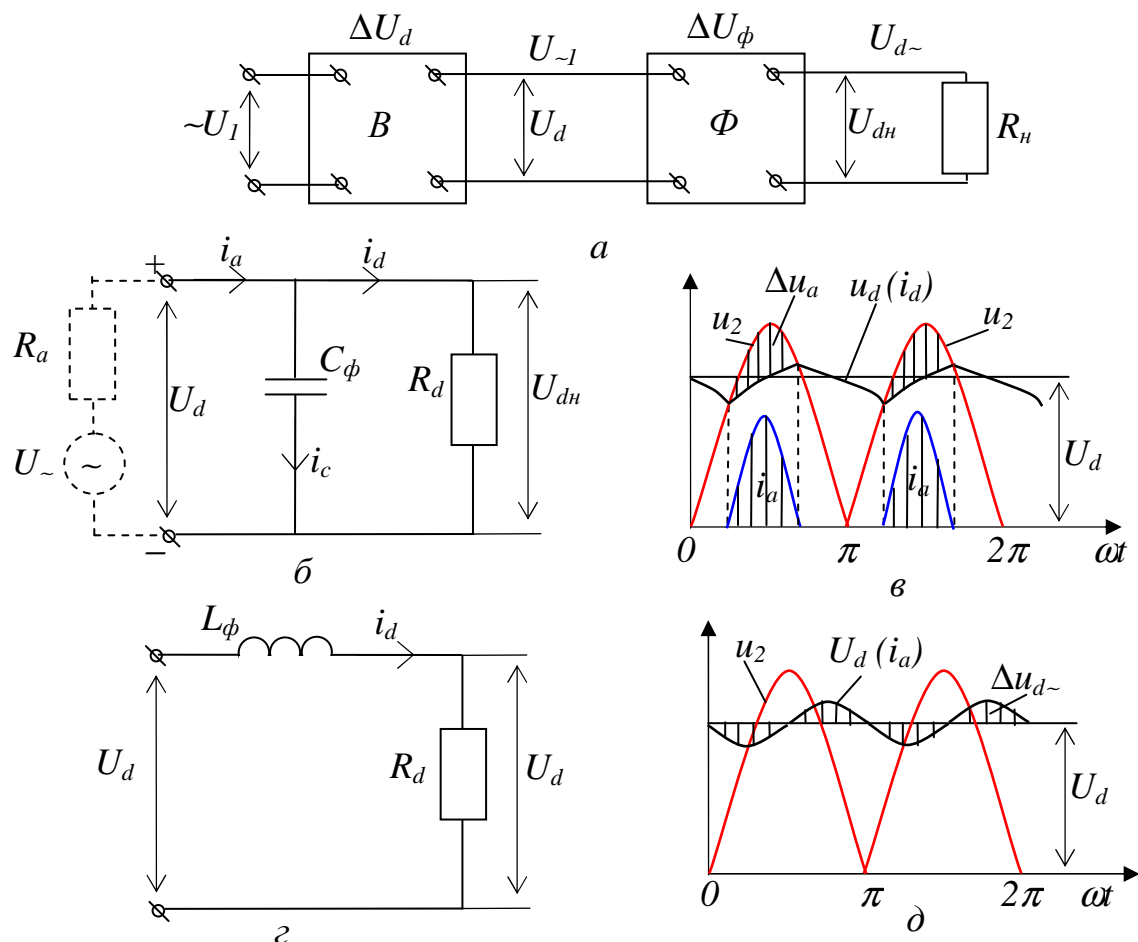


Рисунок 13.17 – Схемы включения фильтров: а – блок-схема выпрямителя с фильтром; б – емкостный фильтр; в – индуктивный фильтр; з и д – кривые напряжений и токов

Емкостный фильтр более эффективен в выпрямителях на малые токи I_d (с большими R_d), так как в таком фильтре легче получить неравенство $\omega C_\phi \gg 1/R_d$ при небольших значениях емкости C_ϕ .

При расчете емкостного фильтра исходным обычно является требуемое значение коэффициента пульсаций q_1 , а также заданные значения угловой частоты $\omega_c = 2\pi f_1$ источника питания и сопротивления нагрузки R_d . Значение C_ϕ (в мкФ) может быть определено из выражения:

$$C_\phi = \frac{1}{m \cdot \omega_c \cdot q_1} \frac{10^6}{R_d}. \quad (13.39)$$

Индуктивный фильтр (рис. 13.17, з) представляет собой дроссель L_ϕ , включаемый последовательно с нагрузкой и обладающий большим реактивным сопротивлением $X_L = \omega_c \cdot L_\phi$ для переменной составляющей выпрямленного тока, которая значительно уменьшается, и падение напряжения ΔU_d от этой составляющей R_d становится незначительным (рис. 13.17, д).

Для хорошего сглаживания напряжения на нагрузке необходимо, чтобы

$$x_L = \omega_1 \cdot L_\phi \gg R_d. \quad (13.40)$$

При заданном коэффициенте сглаживания s необходимое значение индуктивности фильтра L_ϕ (в генри) с учетом выполнения условия (13.40) определяется из выражения:

$$L_\phi = \frac{s \cdot R_d}{2\pi \cdot f_c \cdot m}, \quad (13.41)$$

где f_c – частота напряжения сети, Гц;

m – число фаз выпрямления.

Анализ формулы (13.41) показывает, что одно и то же значение коэффициента s может быть получено при тем меньших значениях индуктивности L_ϕ , чем меньше сопротивление нагрузки R_d . Таким образом, **индуктивный фильтр выгодно применять в выпрямителях средней и большой мощности, у которых сопротивление нагрузки мало.**

Если требуется иметь очень малое значение коэффициента пульсаций q_1 , то емкость C_ϕ или индуктивность L_ϕ , применяемые в качестве простейших фильтров, могут получиться значительными. В таких случаях применяют более сложные Г-образные или П-образные фильтры [17, 34].

13.4 Усилители

Усилителями называются устройства, предназначенные для увеличения значений параметров электрических сигналов за счет энергии включенного источника питания. Различные усилители применяются для преимущественного усиления значений тех или иных параметров сиг-

налов. По этому признаку они делятся на усилители напряжения, тока и мощности.

Возможны линейный и нелинейный режимы работы усилителя. В усилителях с практически линейным режимом работы получается минимальное искажение формы усиливаемого сигнала. Искажение сигнала будет минимальным, если без искажения будут усиливаться все его гармонические составляющие. Свойство усилителя увеличивать амплитуду гармонических составляющих сигнала характеризует его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). По типу АЧХ различают:

усилители медленно изменяющихся напряжений и токов, или усилители постоянного тока (рис. 13.18, *а*) – диапазон изменения усиливаемых сигналов от 0 до 10^3 Гц;

усилители низких частот (рис. 13.18, *б*) – диапазон изменения усиливаемых сигналов от 20–50 Гц до $20 \cdot 10^3$ Гц;

усилители высоких частот (рис. 13.18, *в*) – диапазон изменения усиливаемых сигналов от 10^4 – 10^5 Гц до 10^7 – 10^8 Гц;

широкополосные усилители (рис. 13.18, *з*) – диапазон изменения усиливаемых сигналов от 20–50 Гц до 10^7 – 10^8 Гц;

узкополосные усилители (рис. 13.18, *д*).

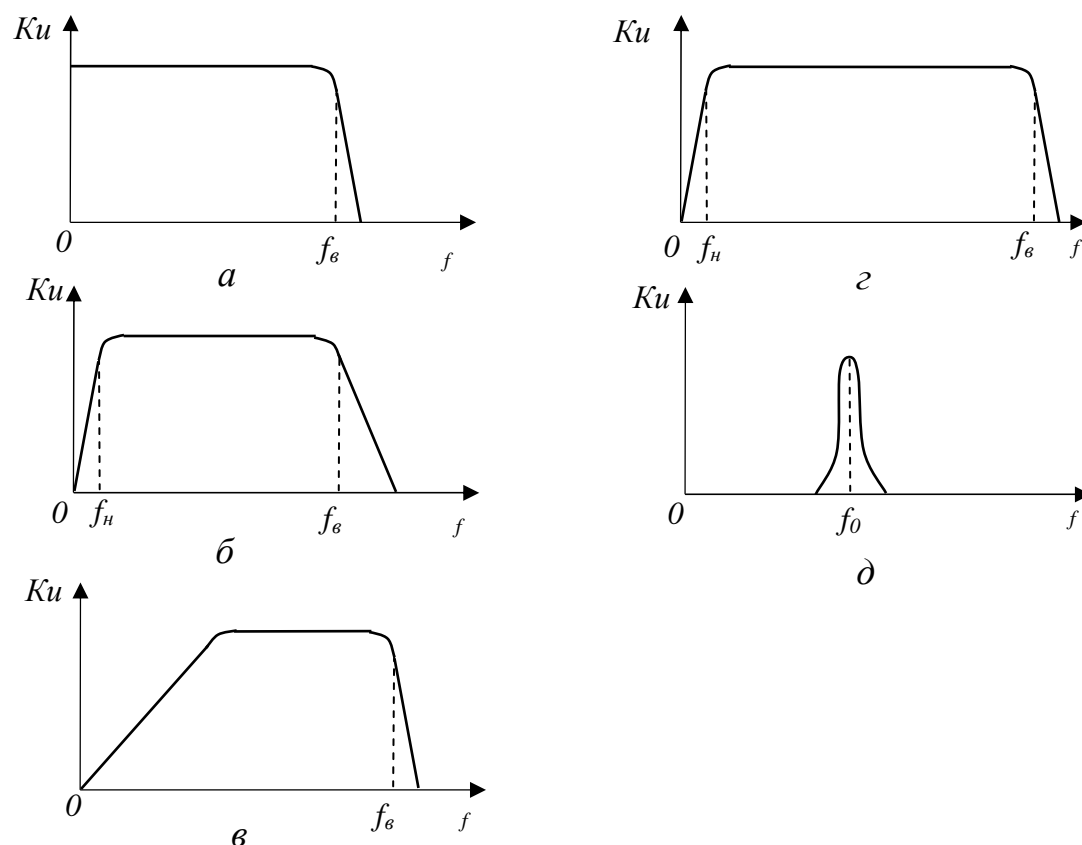


Рисунок 13.18 – Амплитудно-частотные характеристики усилителей

В усилителях с нелинейным режимом работы при увеличении значения напряжения на входе больше некоторого граничного уровня изменение напряжения на выходе усилителя практически отсутствует. Такие усилите-

ли применяются главным образом в устройствах импульсной техники, в том числе логических.

В настоящее время усилительная техника основана на широком использовании усилителей на интегральных микросхемах, которые позволяют их применять для реализации различных функциональных узлов систем автоматики, управления и измерения.

Как было отмечено в подразделе 13.1.4, на практике используются три схемы включения транзисторов: с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором. Соответственно применяются три схемы транзисторных усилителей.

Рассмотрим принцип работы типового усилительного каскада на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (рис. 13.19). Источник усиливаемого сигнала, показанный внутри штриховой линии, представляет собой источник с внутренним сопротивлением $R_{вн}$ и ЭДС $e_c = u_c$.

Резисторы R_1 , R_2 , R_3 в схеме обеспечивают необходимые значения постоянных напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах при питании всех цепей транзистора от одного общего источника питания E_k . Резистор R_3 обеспечивает температурную стабилизацию рабочей точки, что для транзисторных усилительных схем очень существенно. С ростом температуры постоянная составляющая тока эмиттера $I_{э0}$ возрастает, вследствие чего увеличивается падение напряжения $R_3 \cdot I_{э0}$ на резисторе R_3 , при этом потенциал эмиттера относительно базы снижается, что уменьшает постоянную составляющую тока базы и ограничивает степень нарастания тока покоя в цепи коллектора. Для устранения этого воздействия при прохождении по цепям транзистора переменных составляющих резистор R_3 шунтируется конденсатором C_3 . Конденсаторы C_1 и C_2 предназначены для предотвращения попадания постоянной составляющей тока от источника питания и сигнала на выход и вход усилительного каскада.

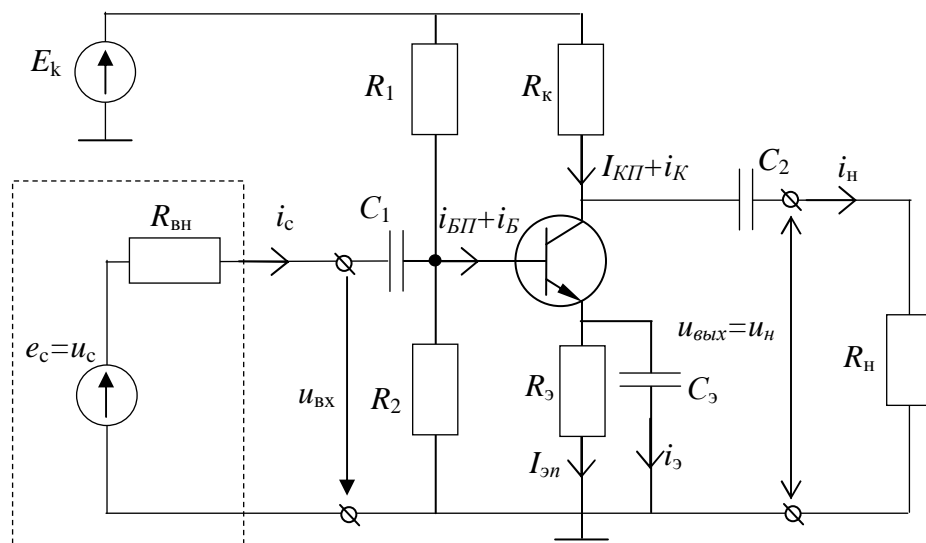


Рисунок 13.19 – Схема усилительного каскада с общим эмиттером

Одним из важнейших показателей, характеризующих свойства усилителей, является его комплексный коэффициент усиления, который в общем случае можно представить как отношение комплексного напряжения на выходе усилителя к комплексному напряжению на его входе:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{вых}} e^{j\psi_{\text{вых}}}}{\dot{U}_{\text{вх}} e^{j\psi_{\text{вх}}}} = K \cdot e^{j(\psi_{\text{вых}} - \psi_{\text{вх}})} = K \cdot e^{j\varphi}, \quad (13.42)$$

где $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$ – модуль коэффициента усиления усилителя;

$\varphi = \psi_{\text{вых}} - \psi_{\text{вх}}$ – разность фазовых углов сигнала на выходе и входе усилителя.

Усилители неизбежно содержат комбинации активных и реактивных элементов, поэтому модуль коэффициента усиления и разность фазовых углов на выходе и входе усилителя являются частотно-зависимыми. В процессе изучения усилителя зависимость модуля коэффициента усиления от частоты $K(f)$ амплитудно-частотные характеристики усилителя и зависимость изменения фазового угла от частоты обычно рассматривают отдельно. Области частот (рис. 13.20) от 0 до f_n и от f_e до $f = \infty$ характеризуются значительным изменением коэффициента усиления. *Область изменения частоты входного сигнала от f_n до f_e называется **полосой пропускания усилителя** и характеризуется незначительным изменением коэффициента усиления от частоты.*

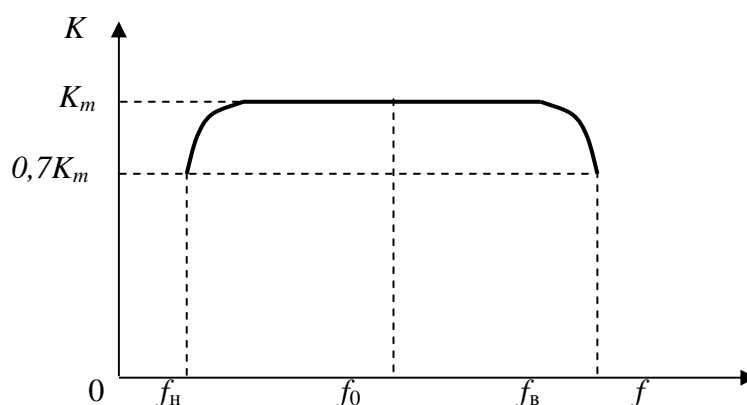


Рисунок 13.20 – АЧХ усилителя с ОЭ

Для получения больших значений коэффициентов усиления на практике применяют многокаскадные схемы, пример которой для схемы с общим эмиттером показан на рисунке 13.21.

щего напряжение переключения, а также подачей на управляющий электрод положительного импульса при прямом напряжении на аноде тиристора.

7. Одной из основных функций транзисторов является усиление электрических сигналов.

8. Величина пульсаций выпрямленного напряжения зависит от схемы выпрямителя и качества сглаживающего фильтра.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните явление односторонней проводимости полупроводников.
2. Объясните вольт-амперную характеристику $p-n$ перехода.
3. Объясните устройство кремниевого диода.
4. Поясните, каковы отличительные особенности германиевых диодов.
5. Поясните, каковы отличительные особенности селеновых диодов.
6. Объясните устройство тиристора.
7. Поясните назначение вольт-амперной характеристики тиристора и объясните ее особенности.
8. Каким образом возможно осуществить отпирание тиристора.
9. Объясните устройство биполярного транзистора.
10. Объясните особенности и отличия биполярных и униполярных транзисторов.
11. Какие схемы включения транзисторов применяются на практике?
12. Объясните, в чем состоят особенности работы схемы с общим эмиттером?
13. Объясните, в чем состоят особенности работы схемы с общей базой?
14. Объясните, в чем состоят особенности работы схемы с общим коллектором?
15. Объясните принцип работы однополупериодного однофазного выпрямителя.
16. Поясните принцип работы двухполупериодной однофазной схемы.
17. Поясните принцип работы однофазной мостовой схемы выпрямителя.
18. Поясните принцип работы трехфазной схемы выпрямителя с нулевой точкой.
19. Поясните принцип работы трехфазной мостовой схемы.
20. Поясните принцип работы однофазного управляемого двухполупериодного выпрямителя.
21. Поясните принцип работы трехфазного управляемого выпрямителя с нулевой точкой.

14 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Ключевые понятия: электропривод (ЭП), обратная связь, автоматизированный ЭП, ЭП нерегулируемый (регулируемый, следящий, программно-управляемый, адаптивный), ЭП групповой (одиночный, многодвигательный), статический момент, результирующий момент инерции, реактивный (активный) момент сопротивления, установившийся (переходный) режим ЭП, механическая характеристика двигателя (производственного механизма), жесткость механической характеристики, статическая устойчивость, методы эквивалентных величин, длительный (кратковременный, повторно-кратковременный) режим двигателя.

14.1 Основные понятия

Электрическим приводом (ЭП) называется электромеханическое устройство, предназначенное для автоматизации рабочих процессов.

Рассмотрим основные элементы электропривода (рис. 14.1). Он состоит из электродвигателя ЭД, передаточного устройства ПУ, преобразователя П и управляющего устройства УУ.

В электроприводе, в зависимости от предъявляемых к нему требований, используют двигатели постоянного тока с независимым, параллельным, последовательным или смешанным возбуждением, асинхронные электродвигатели, шаговые электродвигатели. Основной задачей электродвигателя в электроприводе является преобразование электроэнергии источника питания ИП (сети) в механическую энергию вращающегося вала двигателя или в энергию линейно перемещающихся масс, например, если используется линейный двигатель. Иными словами, двигатель должен развивать движущие усилия: движущий момент или движущую механическую силу, передаваемую рабочему органу РО.

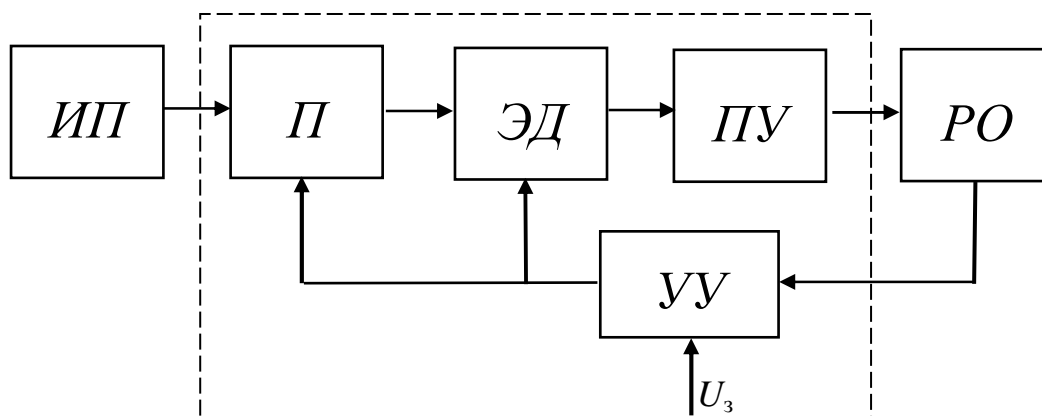


Рисунок 14.1 – Структурная схема электропривода

В некоторых случаях электродвигатель осуществляет обратное преобразование: механическую энергию вращения или линейного перемещения,

поступающую от рабочего органа, в электрическую. В этом случае двигатель создает тормозной момент.

В современном ЭП двигатель приводит в движение рабочий механизм через передаточное устройство, понижающее частоту вращения (редукторы, клиноременные передачи и т. д.), либо повышающее, либо изменяющее вид движения (зубчато-реечные, кривошипно-шатунные и т. д.). В некоторых электроприводах электродвигатель непосредственно соединен с рабочим механизмом.

Важным элементом электропривода является преобразователь, необходимость в котором вызвана следующими причинами. Во-первых, электропривод должен обладать свойством изменения частоты вращения электродвигателя. Как правило, этого добиваются регулированием напряжения и частоты тока, потребляемого двигателем, в то время как частота и напряжение сети являются неизменными. Во-вторых, для работы двигателя постоянного тока необходимо подавать на его обмотки постоянное напряжение, а промышленная сеть имеет переменное напряжение. Поэтому для ее использования в качестве источника питания необходимо преобразовывать напряжение переменного тока в напряжение постоянного тока.

Для регулирования напряжения и частоты, а также для преобразования одного вида напряжения в другой используют преобразователи. В ЭП большой мощности применяют электромашинные преобразователи, в приводах средней и малой мощности – транзисторные и тиристорные преобразователи.

Управляющее устройство ЭП служит для управления преобразованием электрической энергии в механическую и обеспечения необходимого качества технологического процесса. По исполнению оно представляет собой совокупность функционально связанных между собой электромагнитных, электромеханических, полупроводниковых и других элементов. К таким элементам относятся кнопки управления, контроллеры, реле и контакторы, блоки бесконтактной автоматики и др. Многие современные высокоточные ЭП содержат в своей системе управления вычислительные комплексы и ЭВМ специального назначения.

Управление ЭП осуществляется воздействием на преобразователь и электродвигатель управляющих сигналов, выработанных УУ. Управляющий сигнал может формироваться с учетом только задающего сигнала U_3 либо U_3 и сигналов, поступающих от других элементов привода. На рисунке 14.1 показан частный случай, когда на УУ поступают сигналы только от рабочего органа.

В случае, когда управление осуществляется только с учетом задающего сигнала U_3 , система управления ЭП является разомкнутой. Если имеются связи по контролю параметров рабочего механизма, система управления ЭП является замкнутой, и электропривод называется **автоматизированным**

электроприводом. Связи, обеспечивающие поступление сигналов на УУ от других элементов, называются **обратными связями.**

Так как технологические процессы современного производства сложны, а требования к технологической дисциплине постоянно возрастают, возникает необходимость широкого использования достижений современной науки и техники при создании УУ. В настоящее время широко применяют полупроводниковые устройства, управляющие вычислительные машины, микропроцессорную технику.

ЭП в зависимости от ряда признаков делят на классы. Причем в каждый класс входят только те электроприводы, которые обладают тем или иным общим признаком, например классификация в зависимости от применяемого двигателя, от вида силового преобразователя или от вида движения.

Рассмотрим, на какие *классы* подразделяют приводы *по видам регулирования.*

Нерегулируемыми называют ЭП, которые обеспечивают движение рабочих механизмов с одной и той же скоростью, т. е. обеспечивают простейшие операции: пуск, останов и реверсирование двигателя. При этом частота вращения в установившемся режиме определяется естественной механической характеристикой электродвигателя и моментом статической нагрузки.

Регулируемыми называют ЭП, в которых частота вращения двигателя изменяется под воздействием сигнала управления.

Следящими называют ЭП, обеспечивающие автоматическое преобразование любого не заданного заранее входного сигнала в движение производственного механизма. При этом входным сигналом может быть угол поворота какого-либо входного вала, в результате чего выходной вал производственного механизма должен повторять его движение.

Программно-управляемыми называют ЭП, у которых линейное или вращательное перемещение осуществляется по заданной программе. Программа представляет собой последовательность траекторий (или законов) движения производственного механизма, воспроизводимых приводом.

Адаптивным называют ЭП, способный осуществлять автоматический выбор наилучшего режима работы двигателя посредством изменения структуры и параметров системы управления.

В зависимости от способа передачи механической энергии от двигателей к рабочим органам производственных машин ЭП делятся на три класса: групповой, одиночный и многодвигательный привод. **Групповым называется ЭП,** в котором один двигатель приводит в движение с помощью трансмиссий или передач группу рабочих машин или группу рабочих органов одной машины. **Одиночным называется ЭП,** в котором электродвигатель приводит в движение только один рабочий орган машины. В ряде случаев электродвигатель конструктивно встроен в механизм так, что образует

с рабочим органом единое целое. Примерами электрифицированных рабочих органов могут служить электрические ручные машины (см. тему 18), электроталь, электрошпиндель и т. п. **Многодвигательным называется ЭП**, в котором рабочие органы одной машины приводятся в движение несколькими электродвигателями.

14.2 Механика электропривода

Механическая часть ЭП передает механическую энергию от электрического двигателя к производственной машине, где эта энергия реализуется в полезную работу. Конструктивное выполнение механической части ЭП может быть весьма различным, тем не менее, она содержит определенные звенья с общими для разных приводов функциями. Электродвигатель, как звено механической части привода, представляет собой источник или потребитель механической энергии. В механическую часть привода входит лишь его вращающийся элемент (ротор или якорь), который обладает определенным моментом инерции, может вращаться с некоторой скоростью и развивать движущий или тормозящий момент.

Передаточное устройство осуществляет преобразование движения в механической части электропривода. При помощи передаточного устройства может увеличиваться или уменьшаться скорость, изменяться вид движения, например, осуществляться преобразование вращательного движения в поступательное и т. д. К передаточным механизмам относятся редукторы, винтовые, зубчато-реечные или ременные передачи, барабан с тросом, кривошипно-шатунный механизм и т. п. Передаточный механизм характеризуется коэффициентом передачи, представляющим собой отношение скорости на выходе к скорости на входе, механической инерционностью и упругостью его элементов, зазорами и трением в зацеплениях и сочленениях устройства.

Рабочий орган производственной машины реализует подведенную к нему механическую энергию в полезную работу. Чаще всего он является потребителем энергии. Эта функция рабочего органа характерна для механизмов, осуществляющих обработку материалов, подъем или перемещение грузов и т. п. При этом поток механической мощности направлен от двигателя к рабочему органу. Иногда рабочий орган может быть источником механической энергии. В этом случае он отдает механическую энергию, запасенную механизмом, например при спуске груза подъемным краном. Поток механической мощности при этом направлен от рабочего органа к двигателю. Рабочий орган характеризуется определенной инерционностью, рабочим моментом при его вращательном движении или рабочим усилием при поступательном движении. В каждом конкретном механизме рабочий орган имеет свое конструктивное исполнение. В частности, на подъемном кране рабочим органом является крюк, грейфер механизмов подъема, тележка, мост механизмов передвижения, поворотная платформа

механизмов поворота. На подъемнике – это кабина, клеть, скип. На экскаваторе – ковш механизмов упора, тяги и подъема одноковшовых экскаваторов, рабочее колесо роторных экскаваторов, поворотная платформа механизмов поворота.

Передача механической энергии от вала двигателя к рабочему органу или обратно связана с потерями в механических звеньях. Причина потерь – трение в подшипниках, направляющих, зацеплениях и т. п. В механических звеньях, обладающих упругостью, возникают дополнительные потери, обусловленные вязким трением в деформируемых элементах. В результате этого поток мощности, проходя от источника к потребителю, постепенно уменьшается. Потери механической энергии покрываются источником энергии – двигателем при прямом потоке энергии и рабочим органом при обратном.

Работа, совершаемая двигателем или рабочим органом, определяется по формулам:

при вращательном движении

$$W = \int_0^t M \omega dt, \quad (14.1)$$

при поступательном движении

$$W = \int_0^t F v dt, \quad (14.2)$$

где F – сила, Н;

M – момент, Нм;

ω – угловая скорость, рад/с;

v – линейная скорость, м/с.

Механическая мощность равна производной от работы по времени, т. е.

$$P = \frac{dW}{dt} = M \omega \quad (14.3)$$

для вращательного движения и

$$P = F v \quad (14.4)$$

для поступательного движения.

Задача ЭП состоит в выполнении заданных по технологическим требованиям законов движения рабочего органа. При этом чаще всего исходят из того, что закон движения ротора двигателя пропорционален указанному закону для рабочего органа.

Если считать, что механическая часть ЭП состоит из абсолютно жестких не деформируемых элементов и не содержит воздушных зазоров, то движение одного элемента дает полную информацию о движении всех остальных элементов. То есть функциональные зависимости, соответствующие законам движения всех звеньев кинематической цепи привода, пропорциональны друг другу, и от движения одного элемента можно перейти

по заранее известной взаимосвязи между координатами к движению любого другого элемента. Это позволяет рассматривать движение ЭП на каком-либо одном механическом элементе. Обычно таким элементом принимают вал двигателя, и к нему приводят все внешние моменты или силы, а также все инерционные массы механических звеньев.

Для приведения к валу двигателя момента или усилия нагрузки рабочего органа производственной машины воспользуемся балансом мощности в механической части привода

$$P_c = P_{po} + \Delta P, \quad (14.5)$$

где P_c – мощность на валу двигателя;

P_{po} – мощность на рабочем органе;

ΔP – мощность потерь в механических звеньях.

Если для механической части привода известен КПД η , то равенство (14.5) может быть представлено в виде

$$P_c = P_{po} / \eta. \quad (14.6)$$

При вращательном движении рабочего органа мощность на рабочем органе и на валу электродвигателя определяются следующим образом

$$P_{po} = M_{po} \cdot \omega_{po}, \quad P_c = M_c \cdot \omega,$$

где ω_{po} – угловая скорость рабочего органа;

M_{po} – момент нагрузки на рабочем органе;

ω – угловая скорость вала двигателя;

M_c – момент сопротивления на валу двигателя, называемый также статическим моментом.

Тогда

$$M_c \cdot \omega = M_{po} \cdot \omega_{po} / \eta,$$

или

$$M_c = \frac{M_{po}}{i_p \cdot \omega}, \quad (14.7)$$

где $i_p = \omega / \omega_{po}$ – передаточное отношение редуктора.

Аналогичные соотношения могут быть получены для случая поступательного движения рабочего органа. Мощность на рабочем органе

$$P_{po} = F_{po} v_{po}, \quad (14.8)$$

где F_{po} – усилие нагрузки на рабочем органе;

v_{po} – линейная скорость движения рабочего органа.

Тогда

$$M_c \cdot \omega = F_{po} \cdot v_{po} / \eta,$$

или

$$M_c = F_{po} \cdot \rho / \eta, \quad (14.9)$$

где $\rho = v / \omega$ – радиус приведения усилия нагрузки к валу двигателя.

Величина M_c , определяемая соотношением (14.9), **называется моментом сопротивления** (или **статическим моментом**), приведенным к валу двигателя. Значения i_p и ρ определяются по конструктивным параметрам передаточных механизмов.

Смысл приведения инерционных масс и моментов инерции механических звеньев к валу двигателя заключается в том, что эти массы и моменты инерции заменяются одним эквивалентным моментом инерции J на валу двигателя. При этом условием приведения является равенство кинетической энергии, определяемой эквивалентным моментом инерции, сумме кинетических энергий всех движущихся элементов механической части привода.

Эквивалентный момент инерции J , приведенный к валу двигателя, называют результирующим или суммарным моментом инерции электропривода.

Примерами вращающихся элементов в механической части привода могут служить, кроме роторов двигателей, соединительные муфты, тормозные шкивы, барабаны, поворотные платформы экскаваторов и кранов. К поступательно движущимся элементам относятся мосты, тележки и поднимаемые грузы кранов, грузы конвейеров и т. п.

14.3 Уравнение движения электропривода

При изучении движения ЭП возникает необходимость в определении различных механических величин - пути и угла поворота, скорости и ускорения, а также моментов и сил, вызывающих движение и определяющих его характер.

Движение ЭП определяется действием двух моментов: момента, развиваемого двигателем, и момента сопротивления. В зависимости от причины, обуславливающей возникновение момента сопротивления, различают реактивный и активный моменты сопротивления.

Реактивный момент сопротивления появляется только вследствие движения – *это противодействующая реакция механического звена на движение*. Например, моменты трения, возникающие во вращающихся элементах, моменты на крыльчатке центробежных насосов, и т. п. Реактивный момент направлен всегда против движения, т. е. имеет знак, противоположный знаку скорости. Элемент, создающий реактивный момент, может быть только потребителем энергии.

Активный момент сопротивления появляется независимо от движения электропривода и *создается посторонними источниками механической энергии*. Это, например, момент, обусловленный весом перемещаемого по вертикали груза, момент, создаваемый силой ветра. Направление активного момента не зависит от направления вращения, т. е. знак активного момента не связан со знаком угловой скорости. Источник, создающий активный момент, может как потреблять, так и отдавать энергию.

В системах ЭП основным режимом работы электрической машины является двигательный режим. При этом момент сопротивления имеет тормозящий характер по отношению к движению ротора и действует навстречу моменту двигателя. Поэтому положительное направление момента сопротивления принимают противоположным положительному направлению момента двигателя, и основное уравнение движения ЭП имеет вид

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (14.10)$$

В уравнении (14.10) моменты являются алгебраическими, а не векторными величинами, поскольку оба момента M и M_c действуют относительно одной и той же оси вращения.

Правую часть уравнения (14.10) называют динамическим моментом ($M_{\text{дин}}$), т. е.

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (14.11)$$

где момент инерции J определяется по формуле

$$J = \int_m r^2 m, \quad (14.12)$$

где r – расстояние от оси симметрии (радиус вращения);
 m – масса вращающегося тела.

Из уравнения (14.11) вытекает, что при $M = M_c$ скорость вращения электропривода будет неизменной ($\omega = \text{const}$), а динамический момент отсутствует, так как $\frac{d\omega}{dt} = 0$. Такой режим называется **установившимся**.

При $M > M_c$ $\frac{d\omega}{dt} > 0$ происходит ускорение двигателя. Динамический момент в этом случае направлен противоположно моменту двигателя, ограничивая ускорение. Если $M < M_c$, то $\frac{d\omega}{dt} < 0$, и двигатель замедляется. Динамический момент при этом действует согласно с моментом двигателя.

Режим работы ЭП при изменяющейся скорости вращения ($\frac{d\omega}{dt} \neq 0$) называется **переходным**. Переходный режим имеет место при пуске, торможении, изменении нагрузки, регулировании скорости и т. д. Продолжительность переходного режима зависит от момента инерции движущихся масс. На основании уравнения движения (14.11) решают важную практическую задачу о зависимости скорости от времени в переходном режиме или о продолжительности переходного режима ЭП:

$$d\omega = \frac{M - M_c}{J} dt, \quad dt = \frac{J}{M - M_c} d\omega. \quad (14.13)$$

Однако для ее решения необходимо знать зависимости момента двигателя M и момента сопротивления M_c от угловой скорости вала двигателя ω , которые определяются механической характеристикой двигателя (см. подраздел 10.7 и 11.9) и механической характеристикой рабочего механизма, характер которой определяется исключительно свойствами производственного механизма (см. подраздел 14.4).

Для случая поступательного перемещения рабочего органа (линейный электропривод) основное уравнение движения ЭП имеет вид:

$$\pm F \mp F_{ст} = F_{дин} = m \cdot a, \quad (14.14)$$

где F – сила, создаваемая электродвигателем;

$F_{ст}$ – сила статического сопротивления;

$F_{дин}$ – динамическая сила;

m – масса поступательно движущихся тел;

a – ускорение.

В выражении (14.14) динамическая сила $F_{дин}$ зависит от массы m движущихся частей и степени изменения скорости их перемещения, которая выражается ускорением a .

14.4 Механические характеристики производственных механизмов и электродвигателей

При рассмотрении работы электродвигателя, приводящего в действие производственный механизм, необходимо, прежде всего, выявить соответствие механических характеристик электродвигателя характеристике производственного механизма.

Механической характеристикой производственного механизма называют зависимость между скоростью и приведенными к валу двигателя моментом сопротивления механизма $\omega = f(M_c)$.

Механические характеристики производственных механизмов делят на следующие группы.

Механическая характеристика, у которой момент сопротивления M_c не зависит от скорости (прямая 1 на рис. 14.2). Такой характеристикой обладают, например, подъемные краны, лебедки, механизмы подачи металлорежущих станков, поршневые насосы при неизменной высоте подачи, конвейеры с постоянной массой перемещаемого материала. Сюда же могут быть отнесены с известным приближением все механизмы, у которых основным моментом сопротивления является момент трения, так как обычно в пределах рабочих скоростей момент трения изменяется мало.

Линейно возрастающая механическая характеристика (прямая 2 на рис. 14.2). В этом случае момент сопротивления линейно зависит от скорости ω , увеличиваясь с ее возрастанием.

Нелинейно возрастающая (параболическая) механическая характеристика (кривая 3 на рис. 14.2). Момент сопротивления M_c здесь зависит от квадрата скорости. Механизмы, обладающие такой характеристикой, называют иногда механизмами с вентиляторным моментом, поскольку у вентиляторов момент сопротивления зависит от квадрата скорости. К механизмам, обладающим такой механической характеристикой, относятся также центробежные насосы, гребные винты, экскаваторы и т. п.

Как отмечалось в подразделе 10.7, под механической характеристикой электродвигателя понимают зависимость его угловой скорости от вращающего момента, т. е. $\omega = f(M)$. Для электродвигателей характерно снижение скорости вращения при росте момента нагрузки. Однако степень изменения скорости с изменением момента у разных двигателей различна. Она характеризуется показателем, получившим название жесткость. Под **жесткостью механической характеристики электропривода** понимают отношение разности электромагнитных моментов, развиваемых электродвигательным устройством, к соответствующей разности угловых скоростей электропривода. Т. е. жесткость β определяется соотношением

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}. \quad (14.15)$$

Обычно на рабочих участках механические характеристики двигателей имеют отрицательную жесткость $\beta < 0$. Линейные механические характеристики обладают постоянной жесткостью. У нелинейных характеристик жесткость не постоянна и определяется в каждой точке как производная момента по угловой скорости:

$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}. \quad (14.16)$$

Понятие жесткости также может быть применено и к механическим характеристикам производственных механизмов. Эти характеристики можно оценивать жесткостью

$$\beta_c = \frac{\partial M_c}{\partial \omega}. \quad (14.17)$$

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основные категории:

1. *Абсолютно жесткая механическая характеристика* ($\beta = \infty$) – это характеристика, при которой скорость с изменением момента остается неизменной. Такой характеристикой обладают синхронные двигатели (прямая 1 на рис. 14.3).

2. *Жесткая механическая характеристика* – это характеристика, при которой скорость с изменением момента уменьшается в малой степени. Жесткой механической характеристикой обладают двигатели постоянного

тока независимого возбуждения, а также асинхронные двигатели в пределах рабочей части механической характеристики (кривая 2 на рис. 14.3).

3. *Мягкая механическая характеристика* – это характеристика, при которой с изменением момента скорость значительно изменяется. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, особенно в зоне малых моментов (кривая 3 на рис. 14.3). Для этих двигателей жесткость не остается постоянной на всех точках характеристики.

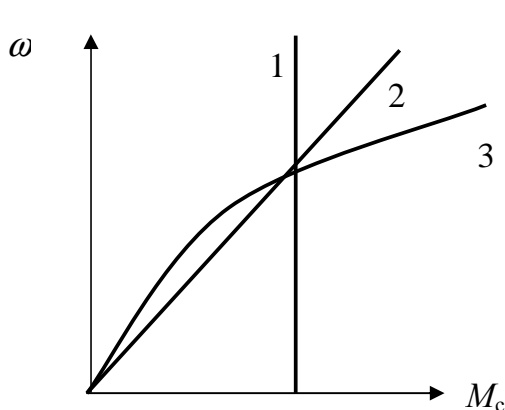


Рисунок 14.2 – Механические характеристики производственных механизмов

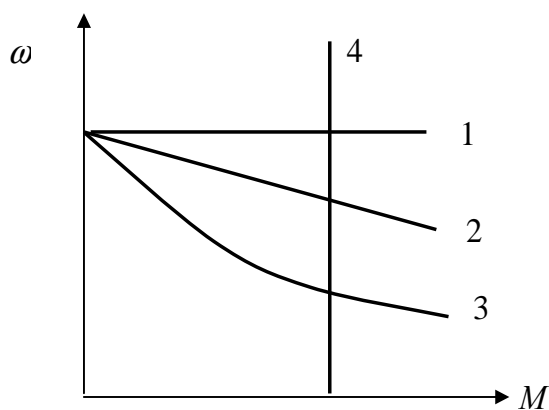


Рисунок 14.3 – Механические характеристики двигателей

4. *Абсолютно мягкая механическая характеристика* ($\beta = 0$) – это характеристика, при которой момент двигателя с изменением угловой скорости остается неизменным. Такой характеристикой обладают, например, двигатели постоянного тока с независимым возбуждением при питании их от источника тока или при работе в замкнутых системах электропривода в режиме стабилизации тока якоря (прямая 4 на рис. 14.3).

Если известны механические характеристики двигателя и производственного механизма, нетрудно найти точки (M, ω), характеризующие установившийся режим. Для этого достаточно сложить графически по моменту две характеристики. Полученную в результате кривую называют **совместной характеристикой электродвигателя и производственного механизма**. Там, где совместная характеристика пересекает ось частоты вращения ω , будет точка установившегося режима, в которой сумма моментов двигателя и механизма равна нулю. Следовательно, в соответствии с выражением (14.10) частота вращения не будет изменяться во времени.

На рисунке 14.4 в качестве примера представлены механическая характеристика двигателя 1 и механизма подачи токарного станка 2. Кривая 3 совместной характеристики получена следующим образом. Берется произвольная частота вращения ω_1 и определяются без учета знака моменты, создаваемые двигателем M_1 и производственным механизмом $M_{ст1}$. Затем графически определяется их разность $M_{сов1}$. Результат откладывается в сто-

рону большего из моментов M_1 и $M_{ст1}$ при той же частоте вращения ω_1 . Затем эта процедура повторяется при другой частоте вращения ω_1 , и т. д. Через полученные точки проводится кривая, которая является совместной характеристикой.

В примере (рис. 14.4) совместная характеристика пересекает ось ω в точке ω' , т. е. момент в точке с частотой вращения ω' равен нулю. Следовательно, при этой частоте вращения выполняется условие (14.10) и имеет место установившийся режим. Используя характеристики 1 и 2, нетрудно определить момент M' , развиваемый электродвигателем, и $M_{ст}$ производственного механизма в этом режиме. На практике координаты точки установившегося режима определяют несколько иначе.

Условие (14.10) выполняется, если абсолютное значение M равно $M_{ст}$. Следовательно, если в механической характеристике производственного механизма перед моментом опустить знак минус, точка установившегося режима окажется там, где пересекутся вновь полученная характеристика и механическая характеристика двигателя. Графически переход от отрицательных моментов статического сопротивления к положительным заключается в зеркальном отображении кривой 2 относительно оси ω в первый квадрант. На рисунке 14.4 этой характеристикой является кривая 4, и следовательно, установившийся режим отображается точкой A с координатами M', ω' .

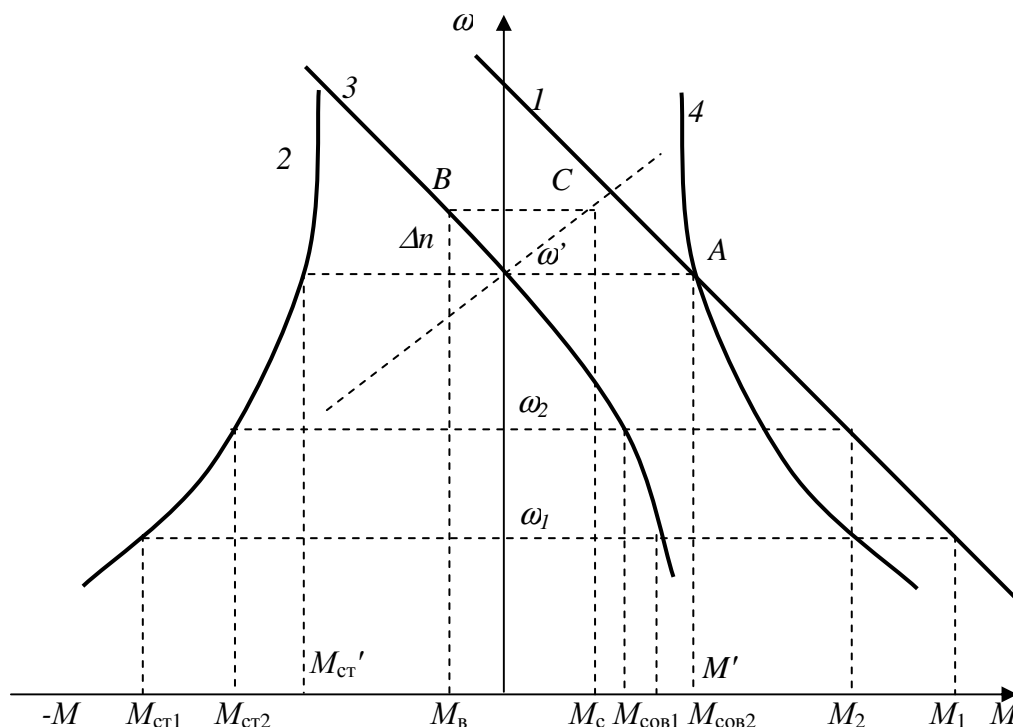


Рисунок 14.4 – Совместная характеристика электродвигателя и производственного механизма

Работе электрического двигателя и производственного механизма в установившемся режиме соответствует равновесие момента сопротивления

механизма и вращающего момента электродвигателя при определенной скорости, т. е. $M = M_c$.

Изменение момента сопротивления на валу двигателя приводит к тому, что скорость двигателя и момент, который он развивает, могут автоматически изменяться, и привод будет продолжать устойчиво работать при другой скорости с новым значением момента. В электрических двигателях роль автоматического регулятора может выполнять ЭДС двигателя. Пусть $M = M_1$, и двигатель работает со скоростью ω_1 . С увеличением нагрузки двигатель тормозится, скорость его снижается, благодаря чему уменьшается ЭДС. При уменьшении ЭДС возрастают ток в якорной цепи двигателя и момент, развиваемый двигателем. Рост момента двигателя продолжается до тех пор, пока не наступит равновесие моментов $M = M_2$, соответствующее новой скорости ω_2 . Рассмотренные условия работы электропривода в установившемся режиме характеризуют *статическую устойчивость привода*, когда изменение во времени скорости и момента происходит относительно медленно в отличие от динамической устойчивости, имеющей место при переходных режимах.

Под статической устойчивостью понимают такое состояние установившегося режима работы привода, когда при случайно возникшем отклонении скорости от установившегося значения привод возвратится в точку установившегося режима. При неустойчивом движении любое, даже самое малое, отклонение скорости от установившегося значения приводит к изменению состояния привода - он не возвращается в точку установившегося режима. Привод статически устойчив, если в точке установившегося режима выполняется условие

$$\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} < 0. \quad (14.18)$$

или

$$\beta - \beta_c < 0. \quad (14.19)$$

Условие (14.18) означает, что привод статически устойчив, если при положительном приращении угловой скорости момент двигателя окажется меньше статического момента (момента сопротивления), и привод вследствие этого затормозится до прежнего значения скорости. При отрицательном приращении угловой скорости момент двигателя окажется больше момента сопротивления, и привод вследствие этого разгонится до прежнего значения скорости.

При постоянном моменте нагрузки (прямая 1 на рис. 14.2) статическая устойчивость определяется только жесткостью механической характеристики двигателя, так как $\frac{dM_c}{d\omega} = 0$. Если она отрицательна, то работа в установившемся режиме устойчива $\frac{dM}{d\omega} - \frac{dM_c}{d\omega} = \frac{dM}{d\omega} < 0$.

Обычно при проектировании электропривода механическая характеристика производственного механизма является уже заданной. Поэтому для получения устойчивой работы в установившемся режиме для определенных скоростей и моментов сопротивления производственных механизмов необходимо подбирать механическую характеристику электродвигателя соответствующей формы. Это может быть достигнуто подбором электродвигателя соответствующего типа и изменением электрических параметров его цепей.

14.5 Выбор электродвигателя

Выбор двигателя при проектировании ЭП является важным этапом. Никакие элементы системы управления, либо обратные связи, не способны обеспечить требуемые вращающие моменты, нужные скорости и ускорения механизма, если конструкция двигателя, основного силового узла привода, не создает для этого условий.

Правильный выбор двигателя определяется как экономическими, так и техническими требованиями к его параметрам и показателям. Прежде всего, при выборе отдают предпочтение наиболее простым, дешевым и надежным двигателям - асинхронным и синхронным. Если эти машины не могут удовлетворить техническим требованиям, выбирают двигатели постоянного тока.

К требованиям, предъявляемым к параметрам двигателя, относятся: номинальное напряжение, соответствующее напряжению сети; мощность, обеспечивающая преодоление моментов сопротивления при необходимых скоростях и ускорениях; перегрузочная способность, обеспечивающая работу привода при кратковременных нагрузках; диапазон изменения скорости при регулировании, соответствующий требованиям технологического процесса и т. д.

Наиболее существенным параметром, по которому выбирают двигатель, является мощность. Машина считается выбранной правильно по мощности, если она выполняет требуемые функции и не перегревается. Рассмотрим физический смысл выбора двигателя по мощности.

Существенной частью конструкции любой электрической машины являются изоляционные материалы, которые обладают физико-химическими свойствами, позволяющими изолировать отдельные проводники обмоток друг от друга. Если изоляционные материалы теряют свои свойства, происходит закорачивание отдельных участков обмоток, и машина выходит из строя. Изоляционные материалы теряют свои диэлектрические свойства, если их температура оказывается выше предельно допустимой температуры. *Способность материалов сохранять свои свойства при предельно допустимой температуре называется **нагревостойкостью**.*

Если в процессе работы двигателя с изоляцией соответствующего класса нагревостойкости температура его нагрева окажется меньше (или равна) предельно допустимой температуры этого класса, двигатель будет работать в нормальных условиях. Если же температура двигателя окажется выше предельно допустимой, изоляция начинает терять свои диэлектрические свойства и выходить из строя.

После подключения электрической машины к источнику питания по ее обмоткам протекает ток, перемagnичивается сталь и происходят другие физические процессы, в результате которых часть электрической и механической энергии, называемой потерями ΔP , преобразуется в тепловую. Некоторое количество тепловой энергии отдается в окружающую среду, а остальное расходуется на нагревание двигателя.

В первый момент времени после подключения к источнику питания двигатель интенсивно нагревается, затем этот процесс замедляется, и наступает период, когда температура двигателя практически не изменяется (см. рис. 14.5).

Следует заметить, что когда речь идет о нагревании или охлаждении электрических машин, то обычно вместо действительной температуры пользуются относительной величиной, так называемым **превышением температуры τ** , представляющим собой разность температур машины и окружающей среды.

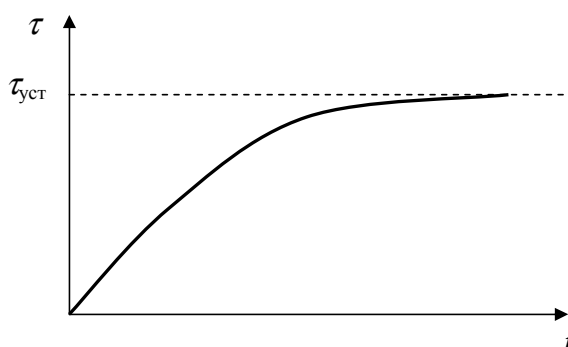


Рисунок 14.5 – Характеристика нагрева двигателя

С некоторым допущением характеристика нагрева электрической машины имеет вид экспоненты (рис. 14.5). Как видно из рисунка, со временем превышение температуры τ стремится к максимальному значению $\tau = \tau_{уст}$.

Электрическая машина не перегревается в течение длительного времени, если установившееся значение превышения ее температуры $\tau_{уст}$ меньше (или равно) допустимого $\tau_{доп}$ для класса изоляции машины: $\tau_{уст} \leq \tau_{доп}$.

До сих пор рассматривался случай, когда момент нагрузки, а следовательно, и мощность, развиваемая двигателем, не изменяются во времени. Если эти величины увеличить, возрастет установившееся превышение температуры двигателя, так как увеличатся токи, протекающие по обмоткам, следовательно, возрастут потери.

В случаях, когда момент нагрузки превышает допустимые для двигателя значения, увеличивается мощность, потребляемая двигателем, и, в результате увеличения потерь в двигателе, $\tau_{уст}$ может оказаться больше $\tau_{доп}$, и двигатель начнет перегреваться. Пределом увеличения нагрузки является

номинальная мощность двигателя. Т. е. если в процессе работы двигатель развивает мощность, не превышающую номинальной, то завод-изготовитель гарантирует его нормальную работу без перегрева.

При нагрузке двигателя можно ориентироваться также на *номинальный ток* и *номинальный момент* двигателя. Ток и момент двигателя не должны превышать его номинальных значений. Это справедливо, если температура окружающей среды соответствует 40°C. Именно на такую температуру окружающей среды ориентируются при тепловых расчетах двигателя в процессе его конструирования.

При постоянной нагрузке для выбора электродвигателя достаточно определить мощность на валу производственного механизма и выбрать по каталогу двигатель той же номинальной мощности или ближайшей большей мощности.

При переменной нагрузке выбор двигателя усложняется. В этом случае используют *нагрузочную диаграмму*, которая определяет *графическую зависимость мощности сопротивления рабочего механизма от времени*, а также нагрузочные диаграммы мощности, потери мощности и тока двигателя. Выбор двигателя заключается в следующем. Известную по нагрузочной диаграмме переменную мощность $P(t)$ механизма (рис. 14.6) заменяют *постоянной средней мощностью*, вычисленной за цикл $t_{ц}$ по формуле

$$P_{cp} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_6 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + \dots + t_6} \quad (14.20)$$

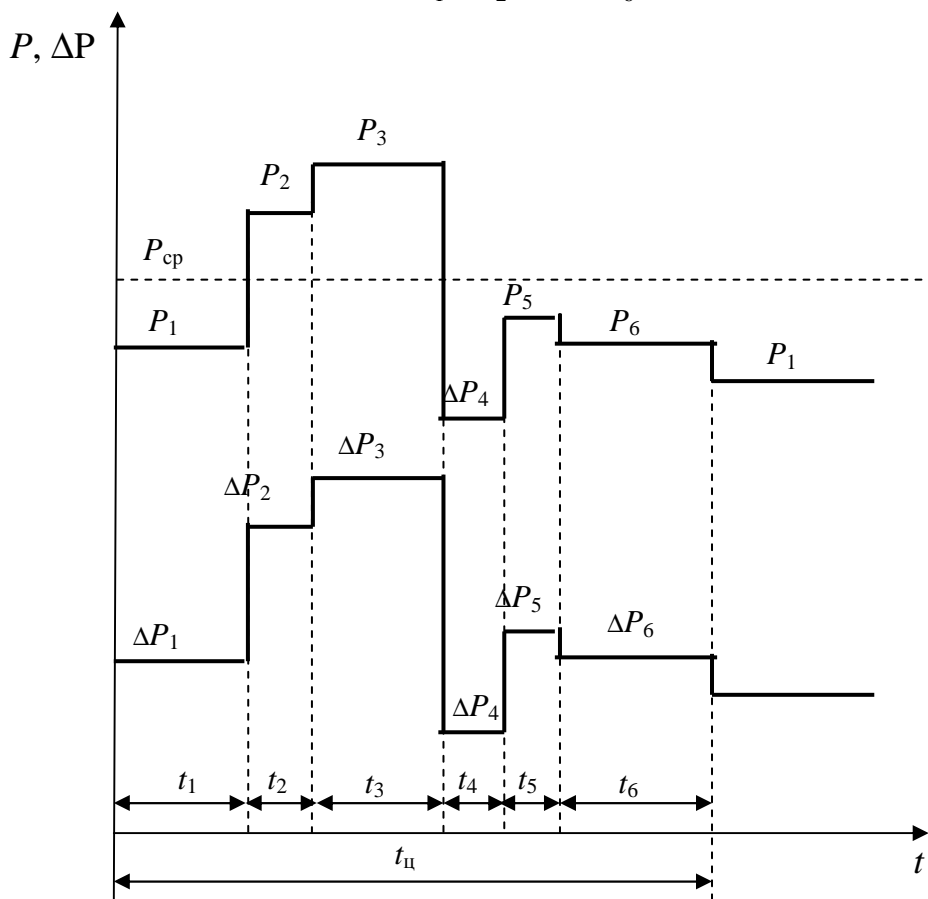


Рисунок 14.6 – Ступенчатая нагрузочная диаграмма двигателя

Затем $P_{\text{ср}}$ умножают на **коэффициент запаса** $k_3 = 1,14\text{--}1,3$, $P'_{\text{ср}} = P_{\text{ср}} k_3$. Далее по $P'_{\text{ср}}$ выбирают двигатель, строят для него одну из нагрузочных диаграмм и делают поверочный расчет.

Для более точного выбора двигателя используют **метод средних потерь**. Для этого метода берут диаграмму мощности двигателя, которая отличается от нагрузочной диаграммы мощности производственного механизма появлением динамического момента при изменении скорости привода. Действительно, в переходных режимах мощность, вырабатываемая двигателем, затрачивается не только на преодоление статического момента сопротивления, но и на преодоление динамического момента.

Обычно этим отличием пренебрегают, а для метода средних потерь используют диаграмму производственного механизма. Сначала для каждого участка нагрузочной диаграммы с постоянной мощностью с помощью характеристики КПД $\eta(P)$ определяют потери двигателя ΔP , а затем средние потери для всей нагрузочной диаграммы по выражению

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta P_6 \cdot t_6}{t_1 + t_2 + \dots + t_6}, \quad (14.21)$$

где $\Delta P_1\text{--}\Delta P_6$ – потери на участках 1–6 диаграммы;

$t_1\text{--}t_6$ – продолжительность участков 1–6 диаграммы (рис. 14.6).

Далее определяют номинальные потери $\Delta P_{\text{ном}}$ по номинальной мощности двигателя и $\eta_{\text{ном}}$ в номинальном режиме, затем сравнивают значения $\Delta P_{\text{ном}}$ и $\Delta P_{\text{ср}}$. Если $\Delta P_{\text{ном}} \geq \Delta P_{\text{ср}}$, то полагают, что $\tau_{\text{уст}} \leq \tau_{\text{доп}}$, и двигатель выбран правильно. Если $\Delta P_{\text{ном}} < \Delta P_{\text{ср}}$, то необходимо выбрать из каталога следующий ближайший двигатель большей мощности и повторить расчет.

Шире используют менее точные, но более простые **методы эквивалентных величин**: тока, момента и мощности. В каждом из этих методов по построенной для предварительно выбранного двигателя диаграмме определяют значение эквивалентной величины тока, момента или мощности на основании следующих выражений:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (14.22)$$

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (14.23)$$

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (14.24)$$

Полученные значения эквивалентных величин сравнивают с соответствующей номинальной величиной. Если номинальное значение оказывается не меньше эквивалентного, двигатель по мощности выбран правильно.

Необходимо помнить, что правильно выбранный двигатель по мощности может быть непригоден для использования в приводе, если его перегрузочная способность неудовлетворительна.

Проверка двигателя по допустимой перегрузке в методе эквивалентного тока производится по выражению

$$I_{\max}/I_{\text{ном}} \leq \lambda_i, \quad (14.25)$$

где I_{\max} – максимальное значение тока при переменной нагрузке;

λ_i – допустимый коэффициент перегрузки двигателя по току (для двигателей постоянного тока общего назначения $\lambda_i = 2-2,5$; для специальных двигателей он может быть больше).

Если условие (14.25) не выполняется, следует выбрать по каталогу следующий двигатель большей мощности и проверить его только по перегрузочной способности.

При выборе асинхронного двигателя необходимо проверить, чтобы его максимальный момент был больше наибольшего момента нагрузочной диаграммы.

Для двигателей постоянного тока независимого или параллельного возбуждения, а также асинхронных и синхронных может быть применен каждый из перечисленных методов.

Для двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения пригодны только метод средних потерь и метод эквивалентного тока.

Нами рассмотрен выбор двигателя при *длительном режиме работы*, когда температура двигателя успевает достичь установившегося значения. Однако двигатель может также работать и в *кратковременном режиме*, когда за рабочий период он не успевает нагреться до установившегося значения, а за время отключения успевает остыть до температуры окружающей среды. В кратковременном режиме двигатель необходимо нагружать мощностью выше номинальной, с тем, чтобы он был полностью использован по нагреву. Максимальную дозировку нагрузки осуществляют из условия $\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}$.

Двигатели общего назначения использовать в кратковременном режиме нецелесообразно, так как они обладают невысокой перегрузочной способностью и требуют завышенной мощности.

Для кратковременных режимов промышленность выпускает специальные двигатели с повышенной перегрузочной способностью и с указанием номинальной нормированной длительности работы (10, 30, 60 и 90 мин). Выбор двигателя осуществляют так же, как и в длительном режиме, используя номинальные данные, соответствующие действительному времени работы. Если время работы отличается от нормированного, реальные

параметры двигателя (мощность, ток, момент) приводят к ближайшему выбранному нормированному времени.

Существует еще один режим работы двигателя – **повторно-кратковременный**, при котором рабочие периоды (t_p) чередуются с паузами (t_n). В рабочий период двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а в период паузы – остыть до температуры окружающей среды. Повторно-кратковременный режим характеризуется **относительной продолжительностью включения**, которая определяется соотношением

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100\% \quad (14.26)$$

Для повторно-кратковременного режима так же, как и для кратковременного, выпускают специальные двигатели с повышенными пусковыми моментами. Нормированная относительная продолжительность включения таких двигателей 15, 25, 40 и 60%. При этом учитывается, что время цикла не превышает 10 мин, в противном случае режим считают продолжительным. В каталогах для двигателей, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме указывают их номинальные данные для каждого нормированного (стандартного) значения $ПВ_{ст}$.

Выбор двигателя производят так же, как и для длительного режима, используя номинальные данные для соответствующего значения $ПВ_{ст}$. Если действительная продолжительность включения ($ПВ$) отличается от стандартной ($ПВ_{ст}$), двигатель выбирают по номинальным данным, соответствующим ближайшему $ПВ_{ст}$. При этом реальные параметры двигателя (мощность, ток, момент) приводят к выбранному параметру $ПВ_{ст}$.

Выводы

1. Основными узлами электропривода являются электрический двигатель, передаточное устройство, устройство управления, преобразователь и рабочий орган.
2. Управление электроприводом осуществляется путем воздействия на преобразователь и электродвигатель управляющих сигналов, выработанных устройством управления.
3. По виду регулирования электроприводы делятся на нерегулируемые, регулируемые, следящие, программно-управляемые и адаптивные.
4. Основной задачей электропривода является выполнение заданных технологическими требованиями законов движения рабочего органа.
5. Основным режимом работы электропривода является установившийся режим.

6. Различают четыре категории механических характеристик электродвигателей: абсолютно жесткие, жесткие, мягкие и абсолютно мягкие.

7. Электропривод считается статически устойчивым, если при увеличении или уменьшении угловой скорости он возвращается к прежней величине угловой скорости.

8. Работа электропривода в установившемся режиме устойчива, если жесткость механической характеристики двигателя отрицательна.

9. Различают кратковременный, повторно-кратковременный и длительный режимы работы электродвигателя.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение электрического привода. Назовите его основные элементы.

2. Как классифицируют системы электроприводов?

3. Что такое статический момент? От чего он зависит?

4. Охарактеризуйте понятия «приведенный момент инерции» и «динамический момент».

5. Для чего производят приведение моментов к оси двигателя?

6. Как записывается уравнение движения электропривода?

7. От чего зависят режимы работы электропривода?

8. От чего зависит продолжительность переходного режима электропривода?

9. Охарактеризуйте понятие жесткости механической характеристики. Как классифицируют механические характеристики по жесткости?

10. Дайте определение статической устойчивости электропривода.

11. От чего зависит нагрев электрического двигателя?

12. Перечислите возможные режимы работы электродвигателей. По каким условиям выбирается их мощность?

13. Как выбирают мощность двигателя для режима длительной постоянной нагрузки?

14. В чем сущность метода эквивалентного момента? Охарактеризуйте область его применения.

15. В каком случае режим работы двигателя считается длительным?

16. Какой режим называется повторно-кратковременным? Как при этом определяют относительную продолжительность включения?

17. Как выбирают мощность двигателя для повторно-кратковременного режима?

15 РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Ключевые понятия: регулирование скорости, диапазон регулирования угловой скорости, плавность регулирования, экономичность регулирования, стабильность угловой скорости, направление регулирования, допустимая нагрузка двигателя, скважность управляющих импульсов.

15.1 Основные показатели регулирования угловой скорости электроприводов

В промышленности используется большое количество производственных механизмов, работающих с различной, изменяющейся скоростью. В частности, в лифтах, подъемных и транспортных механизмах скорость необходимо снижать по мере приближения к пункту остановки, чтобы обеспечить плавное замедление и точную остановку в нужном месте. Скорость, при которой должен работать дымосос котельной, определяется качеством топлива, его влажностью, зольностью, условиями процесса горения и требуемой производительностью котла. Во всех этих механизмах, как и во многих других, для достижения высокой производительности и требуемого качества работы необходимо осуществлять регулирование скорости.

Регулированием скорости называется *принудительное изменение скорости электропривода в зависимости от требований технологического процесса*. Регулирование скорости осуществляется управляющим воздействием на приводной двигатель. Основными показателями, характеризующими различные способы регулирования скорости электроприводов, являются: диапазон регулирования; плавность; экономичность; стабильность скорости; направление регулирования скорости (уменьшение или увеличение скорости относительно основной); допустимая нагрузка при различных скоростях.

Диапазон регулирования угловой скорости - это отношение возможных установившихся скоростей: максимальной ω_{\max} к минимальной ω_{\min} при заданной точности регулирования (с заданным статическим падением скорости электропривода) для установленных пределов изменения момента нагрузки и других возмущений.

$$D = \omega_{\max} : \omega_{\min} \quad (15.1)$$

Обычно диапазон регулирования выражается в числах в виде отношения, например: 2:1, 4:1, 10:1, 20:1 и т. д.

Плавность регулирования характеризует скачок скорости при переходе от данной скорости к ближайшей возможной. Плавность тем выше, чем меньше этот скачок. Число скоростей, получаемых в данном диапазоне, определяется плавностью регулирования. Ее можно оценить *коэффициен-*

том плавности регулирования, который определяется как отношение двух соседних значений угловых скоростей при регулировании скорости

$$\varphi_{пл} = \omega_i / \omega_{i-1}, \quad (15.2)$$

где ω_i и ω_{i-1} – угловые скорости соответственно на i -й и $(i-1)$ -й ступенях регулирования.

При плавном регулировании $\varphi_{пл} \rightarrow 1$, а число скоростей $z \rightarrow \infty$. Число скоростей z , диапазон регулирования D и коэффициент плавности регулирования связаны между собой соотношением

$$D = \varphi_{пл}^{z-1}. \quad (15.3)$$

Экономичность регулирования характеризуется затратами на изготовление и эксплуатацию электропривода. Необходимо отметить, что экономически выгодным оказывается такой регулируемый электропривод, который обеспечивает большую производительность приводимого им в действие механизма при высоком качестве технологического процесса и сравнительно быстро окупается. При оценке экономичности регулируемого электропривода также принимают во внимание его надежность в эксплуатации и потери энергии в процессе регулирования.

Стабильность угловой скорости характеризуется изменением угловой скорости при заданном отклонении момента нагрузки и зависит от жесткости механической характеристики. Чем больше жесткость характеристики, тем выше стабильность угловой скорости.

Направление регулирования скорости – это уменьшение или увеличение величины скорости по отношению к ее основной величине. Различают однозонное регулирование вниз от основной скорости, однозонное регулирование вверх от основной скорости и двухзонное регулирование, когда имеется возможность получать характеристики выше и ниже естественной.

Допустимая нагрузка двигателя – это наибольшее значение момента, который двигатель способен развивать длительно при работе на регулировочных характеристиках. Она определяется нагревом двигателя и для разных способов регулирования различна. Изменение нагрузочного момента в зависимости от скорости у различных производственных механизмов также различно. Например, многие механизмы требуют регулирования при постоянном моменте. К ним относятся: подъемные краны, лебедки, некоторые прокатные станы и т. п. С другой стороны, существуют механизмы, у которых регулирование скорости осуществляется с постоянной мощностью.

Принципиально путем выбора соответствующей мощности двигателя можно удовлетворить любому изменению нагрузочного момента или мощности при регулировании скорости. Однако регулирование угловой скорости двигателя может оказаться неэкономичным, так как он на разных угловых скоростях будет использоваться неодинаково и на некоторых из

них окажется недогруженным. Недогрузка двигателя ведет к ухудшению эксплуатационных показателей привода, так как при этом уменьшается КПД двигателя, а при переменном токе, кроме того, уменьшается и коэффициент мощности. Поэтому *желательно применять такой способ регулирования, при котором двигатель был бы по возможности полностью загружен при всех угловых скоростях.*

Рассмотрим основные способы регулирования угловой скорости на примере получившего наибольшее применение в строительной индустрии двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

15.2 Регулирование угловой скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Угловая скорость ДПТ с независимым возбуждением определяется выражением

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}. \quad (15.4)$$

Из (15.4) следует, что скорость двигателя постоянного тока с независимым возбуждением можно регулировать следующими тремя способами:

- 1) изменением тока возбуждения I (магнитного потока Φ) двигателя;
- 2) изменением сопротивления цепи якоря R посредством реостатов (реостатное регулирование скорости);
- 3) изменением подводимого к якорю двигателя напряжения U .

15.2.1 Регулирование скорости изменением тока возбуждения (или магнитного потока Φ , который определяется током возбуждения) является одним из наиболее простых и экономичных способов, так как мощность, потребляемая обмоткой возбуждения двигателя, составляет около 2–2,5 % мощности двигателя.

Ток возбуждения регулируют с помощью реостата (рис. 15.1) в случае двигателей малой мощности, или посредством регулятора напряжения РН (рис. 15.2). Регулирование скорости в этом случае осуществляется вверх от основной, причем допустимый момент двигателя изменяется по закону гиперболы, а допустимая мощность остается неизменной. Так как допустимая нагрузка определяется током, равным номинальному, то мощность, развиваемая двигателем, постоянна ($P = P_{\text{ном}} = \text{const}$). Электромеханическим характеристикам $\omega = f(I)$ при изменении тока возбуждения соответствуют различные значения угловой скорости идеального холостого хода, определяемые по формуле

$$\omega = \frac{U}{k\Phi}. \quad (15.5)$$

На рисунке 15.3 показаны электромеханические характеристики двигателя при регулировании скорости потоком возбуждения. Угловая скорость иде-

ального холостого хода ω_0 соответствует естественной характеристике, когда поток $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$. Значения угловых скоростей идеального холостого хода при ослабленном потоке ω_0' и ω_0'' лежат выше ω_0 . Все характеристики пересекаются с осью абсцисс в одной точке. Это следует из того, что при $\omega = 0$ уравнение для любой электромеханической характеристики имеет вид:

$$0 = \frac{U - IR_{\text{я}}}{k\Phi}, \quad (15.6)$$

откуда ток в якоре двигателя определится следующим образом:

$$I = \frac{U}{R_{\text{я}}} = I_{\text{кз}}. \quad (15.7)$$

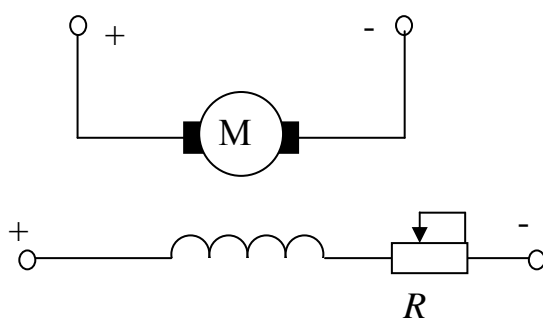


Рисунок 15.1 – Реостатное регулирование потока возбуждения

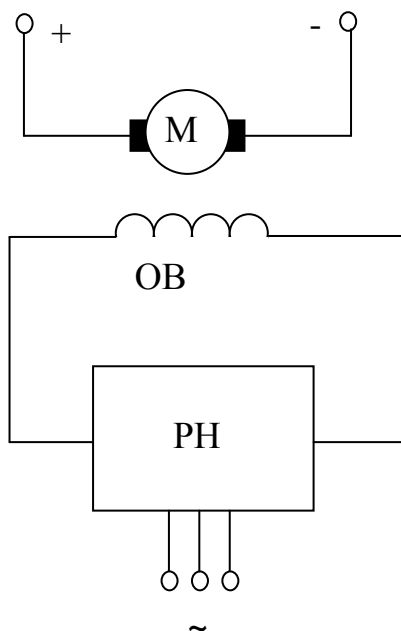


Рисунок 15.2 – Регулирование потока возбуждения регулятором напряжения

Таким образом, при различных токах возбуждения и при угловой скорости двигателя, равной нулю, ток в якорной цепи равен току короткого замыкания двигателя. Этим значением тока и определяется общая точка

пересечения электромеханических характеристик.

Механические характеристики (рис. 15.4) имеют те же значения угловых скоростей идеального холостого хода, что и электромеханические характеристики. Однако эти характеристики не пересекаются в одной точке на оси абсцисс, так как по мере уменьшения потока уменьшается и момент короткого замыкания, определяемый по формуле

$$M_{кз} = k \cdot I_{кз} \cdot \Phi. \quad (15.8)$$

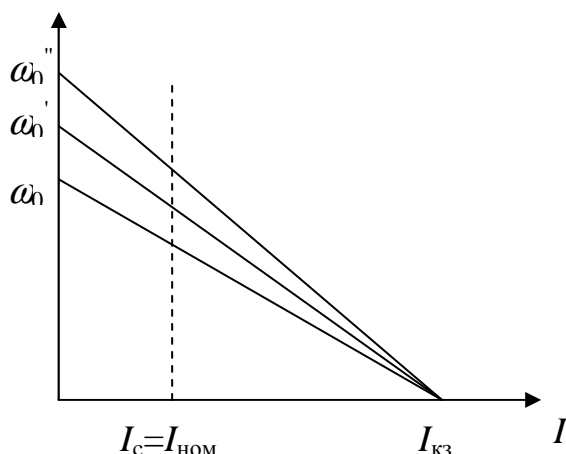


Рисунок 15.3 – Электромеханические характеристики двигателя с независимым возбуждением

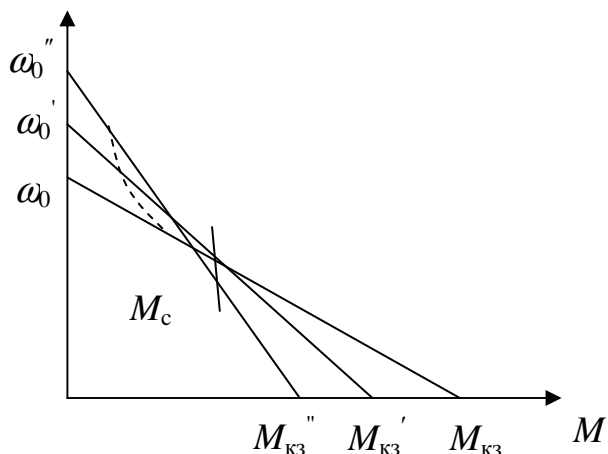


Рисунок 15.4 – Механические характеристики двигателя с независимым возбуждением

Данный способ регулирования является экономичным при постоянной мощности. Полному использованию двигателя соответствуют точки, находящиеся на линии номинального тока $I_c = I_{ном}$. Этому соответствуют точки, лежащие на гиперболической кривой момента сопротивления M_c , как это показано пунктиром на рисунке 15.4. При этом потери мощности в цепи якоря при работе на регулировочных характеристиках будут такими же, как и на естественной характеристике, а потери на возбуждение – меньше. При работе на угловых скоростях, соответствующих точкам, лежащим левее указанной кривой момента M_c , двигатель будет недогружен. Работа на скоростях правее этой кривой приведет к перегрузке двигателя.

Обычно регулируемые двигатели имеют диапазон регулирования от 2:1 до 5:1, в ряде случаев до (8–10):1. Диапазон регулирования ограничивается различными факторами. Главным из них является ухудшение условий коммутации с возрастанием угловой скорости, поскольку реактивная ЭДС, вызывающая искрение на коллекторе, пропорциональна току и угловой скорости, т. е. $E_p = c \cdot I \cdot \omega$. Кроме того, при больших угловых скоростях требуется повышать механическую прочность якоря. Нижний предел угловой скорости ограничивается степенью насыщения машины и нагревом обмотки возбуждения, т. е. номинальной угловой скоростью.

Плавность регулирования в пределах заданного диапазона может быть получена весьма значительной и определяется количеством ступеней регулировочного реостата или же числом ступеней специальных устройств, регулирующих напряжение, подводимое к обмотке возбуждения.

На практике часто используется импульсное параметрическое регулирование тока возбуждения, при котором можно получить плавное регулирование угловой скорости в диапазоне (2–3):1 и более (см. подраздел 15.3).

15.2.2 Реостатное регулирование угловой скорости ДПТ с независимым возбуждением осуществляется путем изменения сопротивления цепи якоря и не требует особых пояснений. В теме 10 рассматривались реостатные механические характеристики ДПТ независимого возбуждения. Подобный вид имеют характеристики и при регулировании угловой скорости посредством реостатов в цепи якоря. В отличие от пускового реостата регулировочный реостат должен быть рассчитан в соответствии с режимом работы привода. Он оказывается включенным не только кратковременно во время пуска, но и во время работы двигателя с заданной угловой скоростью.

При этом способе регулирования изменяется жесткость характеристики, а с ней и стабильность угловой скорости. Угловая скорость регулируется вниз от основной, причем полное использование двигателя по току достигается при регулировании с постоянным номинальным моментом, если двигатель имеет независимую вентиляцию.

Действительно, если считать, что для любой угловой скорости допустимым является номинальный ток, т. е. $I_{\text{доп}} = I_{\text{я.ном}}$, а поток двигателя остается номинальным, то допустимый момент двигателя равен номинальному $M_{\text{доп}} = k \cdot \Phi_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я.ном}} = M_{\text{ном}}$. По мере снижения угловой скорости допустимая мощность двигателя уменьшается, так как $P_{\text{доп}} = M_{\text{ном}} \cdot \omega$. Если допустить перепад угловой скорости в 25% при изменении момента нагрузки на $\pm 25\%$ номинального, то диапазон регулирования составит примерно 2:1.

В большинстве случаев реостатное регулирование угловой скорости производится с помощью контакторов, замыкающих отдельные ступени реостатов, т. е. скорость привода изменяется дискретно, поэтому данный способ при контакторном управлении не обеспечивает плавного регулирования.

Другим способом достижения плавного регулирования при введении реостатов в цепь якоря является использование (при небольшой мощности двигателя) импульсного параметрического регулирования угловой скорости.

Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения при импульсном регулировании добавочного сопротивления в цепи якоря приведена на рисунке 15.5. Добавочный резистор $R_{\text{доб}}$, включаемый в цепь якоря, либо полностью вводится в схему, либо замыкается накоротко ключом K . Коммутация ключа K осуществляется периодически. При замк-

нутом накоротко $R_{доб}$ ток в цепи якоря и угловая скорость двигателя возрастают, а при введении $R_{доб}$ в цепь, когда ключ K разомкнут, ток и угловая скорость снижаются. Колебания тока и угловой скорости происходят около некоторого среднего значения. Среднее значение тока определяется моментом нагрузки на валу двигателя, а среднее значение угловой скорости зависит от соотношения длительностей замкнутого t_1 и разомкнутого t_2 состояния ключа K и от момента нагрузки. Амплитуды колебаний тока и угловой скорости зависят при данных параметрах привода от частоты коммутации ключа K , которая должна быть достаточно высокой.

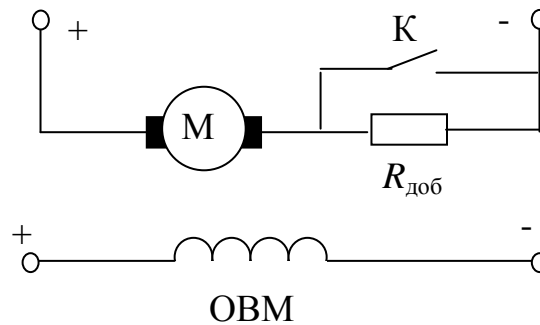


Рисунок 15.5 – Схема включения ДПТ с независимым возбуждением при импульсном регулировании скорости

Соотношение длительностей t_1 замкнутого и t_2 разомкнутого состояний ключа K принято выражать в виде относительной величины

$$\varepsilon = \frac{t_1}{t_1 + t_2}, \quad (15.9)$$

называемой **скважностью управляющих импульсов**. Очевидно, что с увеличением ε при неизменной нагрузке на валу двигателя угловая скорость его будет возрастать, а при $\varepsilon = 1$ двигатель будет работать на естественной характеристике (ключ K постоянно замкнут). При $\varepsilon = 0$ двигатель будет работать на реостатной характеристике, соответствующей постоянно включенному резистору $R_{доб}$ (ключ K разомкнут). При других значениях ε эквивалентное (усредненное) добавочное сопротивление в цепи якоря определяется соотношением

$$R_{доб.э} = R_{доб}(1 - \varepsilon). \quad (15.10)$$

Механические характеристики двигателя (рис. 15.6) определяются формулой (для средних значений угловой скорости и момента)

$$\omega_{cp} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_{cp}}{k\Phi^2} [R_{я} + R_{доб}(1 - \varepsilon)], \quad (15.11)$$

т. е. характеристики имеют тот же вид и те же свойства, что и при чисто реостатном регулировании угловой скорости.

Для реализации импульсного способа регулирования сопротивления (следовательно, и угловой скорости) применяются бесконтактные ключи, выполненные на базе транзисторов (при токах до 15–20 А) или тиристоров (при токах до 100–150 А). На рисунке 15.7 показана схема тиристорного ключа. Роль ключа выполняет тиристор $VS1$, шунтирующий резистор $R_{доб}$ при подаче на него управляющего импульса. Выключается тиристор $VS1$ с помощью вспомогательного тиристора $VS2$, подключающего к тиристу $VS1$ коммутирующий конденсатор C_k , предварительно заряженный через тиристор $VD4$ и резистор R_n от маломощного источника U_n . Выключение тиристора $VS2$ происходит по окончании перезаряда конденсатора C_k от напряжения цепи якоря (падение напряжения на $R_{доб}$ при включенном тиристоре $VS1$). При очередном включении тиристора $VS1$ обратный колебательный перезаряд конденсатора C_k осуществляется через $VS1$, диод $VD3$ и реактор L_k .

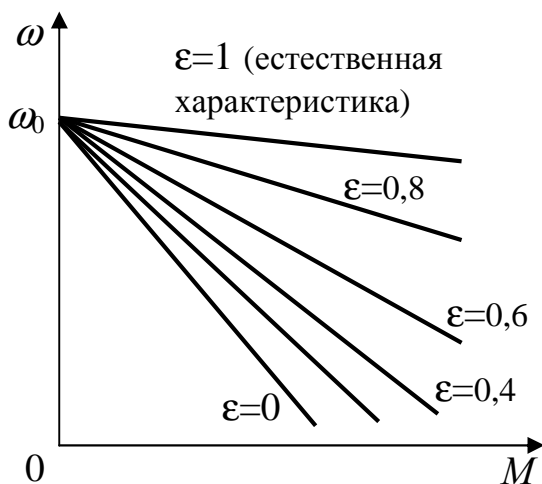


Рисунок 15.6 – Характеристика ДПТ при импульсном регулировании скорости

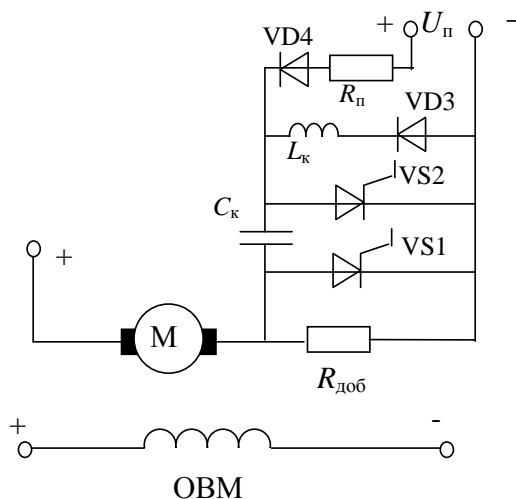


Рисунок 15.7 – Схема тиристорного ключа

При регулировании угловой скорости введением резисторов в цепь якоря двигателя постоянного тока потери мощности в этой цепи пропорциональны потребляемой мощности и перепаду угловой скорости, выраженному в относительных единицах.

15.2.3 Регулирование скорости изменением напряжения на якоре двигателя. Регулирование угловой скорости осуществляется вниз от основной. Со снижением угловой скорости допустимый момент остается постоянным, так как допустимый ток якоря равен номинальному, а поток при независимом возбуждении остается неизменным (номинальным).

Для различных значений напряжения угловая скорость двигателя равна:

$$\omega_1 = \frac{U_1 - IR_{я}}{k\Phi}; \quad \omega_2 = \frac{U_2 - IR_{я}}{k\Phi}.$$

Их отношение

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1 - IR_{\text{я}}}{U_2 - IR_{\text{я}}}. \quad (15.12)$$

Отсюда следует, что при изменении напряжения регулировочные характеристики располагаются параллельно друг другу, т. е. имеют одинаковую жесткость (как показано на рис. 15.8), что определяет относительно высокую стабильность угловой скорости. Диапазон регулирования

$$D = \frac{U_{\text{ном}} - IR_{\text{я}}}{U_{\text{мин}} - IR_{\text{я}}}, \quad (15.13)$$

где $U_{\text{ном}}$ и $U_{\text{мин}}$ – номинальное и минимальное напряжения.

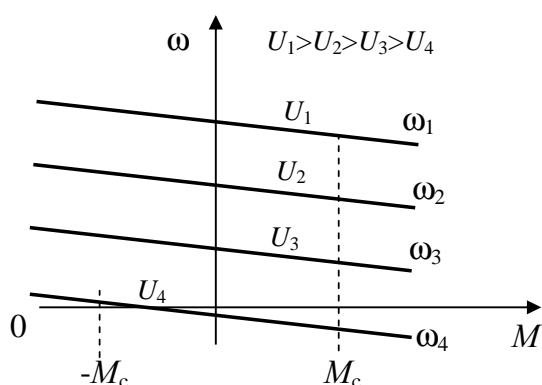


Рисунок 15.8 – Характеристики ДПТ при регулировании скорости изменением напряжения якоря

Из (15.13) следует, что относительный перепад угловой скорости растет со снижением напряжения. Это ограничивает диапазон регулирования значением $D = (8-10) : 1$ в системах привода без обратных связей (в замкнутых системах диапазон регулирования существенно больше и может достигать значений 1000:1 и более).

характеризуется значением коэффициента плавности $\phi_{\text{пл}}$.

Плавность регулирования определяется плавностью изменения напряжения питания и обычно ха-

КПД двигателя в данном случае равен отношению фактической угловой скорости двигателя к угловой скорости идеального холостого хода на заданной характеристике. Потери мощности в якорной цепи при постоянном моменте нагрузки остаются неизменными при регулировании угловой скорости и равны потерям при работе на естественной характеристике. Но поскольку полезная мощность по мере снижения угловой скорости уменьшается, то и КПД двигателя падает. Вследствие малых потерь мощности в цепи якоря этот способ регулирования скорости является экономичным.

Так как напряжение питающей сети поддерживается постоянным, то указанный способ регулирования возможен при использовании соответствующего преобразователя с регулируемым напряжением постоянного тока на его выходе, например, в системе управляемый выпрямитель – двигатель.

На практике применяются и другие системы изменения напряжения на якоре ДПТ, среди которых отметим управляемые тиристорные выпрямители и импульсные регуляторы напряжения (шиотно-импульсные преобразователи). Более подробно с ними можно познакомиться в специальной литературе.

15.3 Регулирование угловой скорости асинхронных двигателей

Электроприводы с АД широко применяются в различных технологических установках. Это объясняется тем, что АД имеют простую конструкцию, надежны в эксплуатации, дешевле, значительно легче и меньше по размерам ДПТ той же мощности. Кроме того, некоторые способы регулирования угловой скорости не требуют специальных преобразовательных устройств.

Наиболее часто трехфазные АД регулируют изменением добавочного сопротивления в цепи ротора (реостатное регулирование) или изменением напряжения подводимого к статору, а также совместным изменением частоты и напряжения питания (частотный способ). Кроме того, скорость АД регулируют переключением числа полюсов обмотки статора двигателя. Для регулирования угловой скорости, кроме указанных, могут быть использованы и некоторые другие способы: импульсное регулирование, регулирование с помощью электромагнитной муфты скольжения и др.

15.3.1 Реостатное регулирование угловой скорости АД. Механические характеристики двигателя при регулировании включением сопротивления в цепь ротора (реостатном регулировании) показаны на рисунке 15.9. Из рисунка следует, что чем большее сопротивление ($R_1 < R_2 < R_3 < R_4$) подключается к роторной цепи, тем меньшую частоту вращения развивает двигатель при том же моменте M_c .

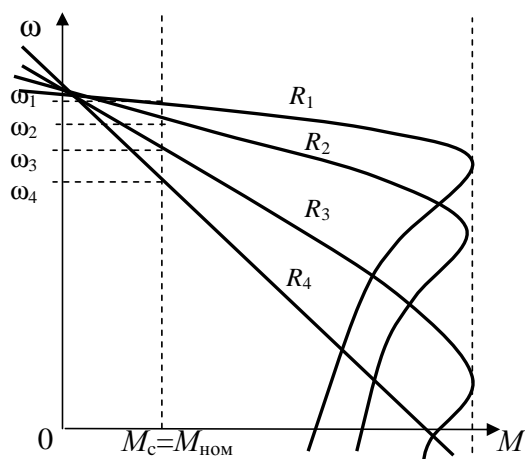


Рисунок 15.9 – Механические реостатные характеристики АД

В роторной цепи проходят большие токи, для которых сложно создать резисторы с непрерывно меняющимся сопротивлением. Поэтому конструктивно резисторы, обеспечивающие реостатное регулирование, выполняют *ступенчатыми* и, следовательно, частоту вращения регулируют ступенчато. Этот способ имеет те же недостатки и достоинства, что и для ДПТ.

Диапазон регулирования постоянен и зависит от нагрузки.

Жесткость характеристик значительно снижается по мере уменьшения частоты вращения, что ограничивает диапазон регулирования до $D = (2-3) : 1$.

Существенными недостатками этого способа являются значительные потери энергии, которые пропорциональны скольжению: $\Delta P_2 = P_1 \cdot s$. Такое регулирование возможно только для АД с фазным ротором.

15.3.2 Регулирование АД изменением напряжения на статоре двигателя. Критический момент M_K изменяется прямо пропорционально квадрату подводимого к двигателю напряжения U_1 , а s_K от него не зависит. Это определяет вид механических характеристик, соответствующих различным значениям U_1 (рис. 15.10).

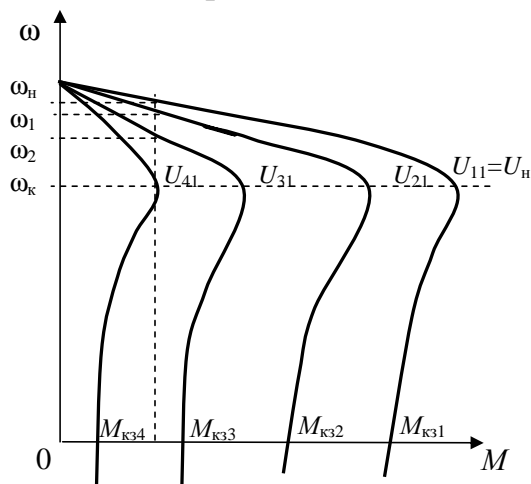


Рисунок 15.10 – Механические характеристики АД при изменении напряжения на статоре

Как правило, регулирование осуществляют уменьшением напряжения. При этом, как видно из рисунка 15.10 ($U_{11} < U_{21} < U_{31} < U_{41}$), частота вращения (критическое скольжение) остается постоянной, а максимальный момент снижается пропорционально квадрату напряжения.

Если $M_c > M_{K3}$, двигатель не тронется с места, поэтому необходимо запускать двигатель при номинальном напряжении питания

или предварительно снимать с его вала нагрузку. Диапазон регулирования небольшой (до ω_K).

Для увеличения диапазона регулирования в цепь ротора вводят регулируемый резистор, сопротивление которого достаточно, чтобы получить критическое скольжение $s_K = 3-4$. Такое регулирование (рис. 15.11) в отличие от реостатного позволяет обеспечить плавное изменение частоты вращения и исключить контактную аппаратуру в роторной цепи.

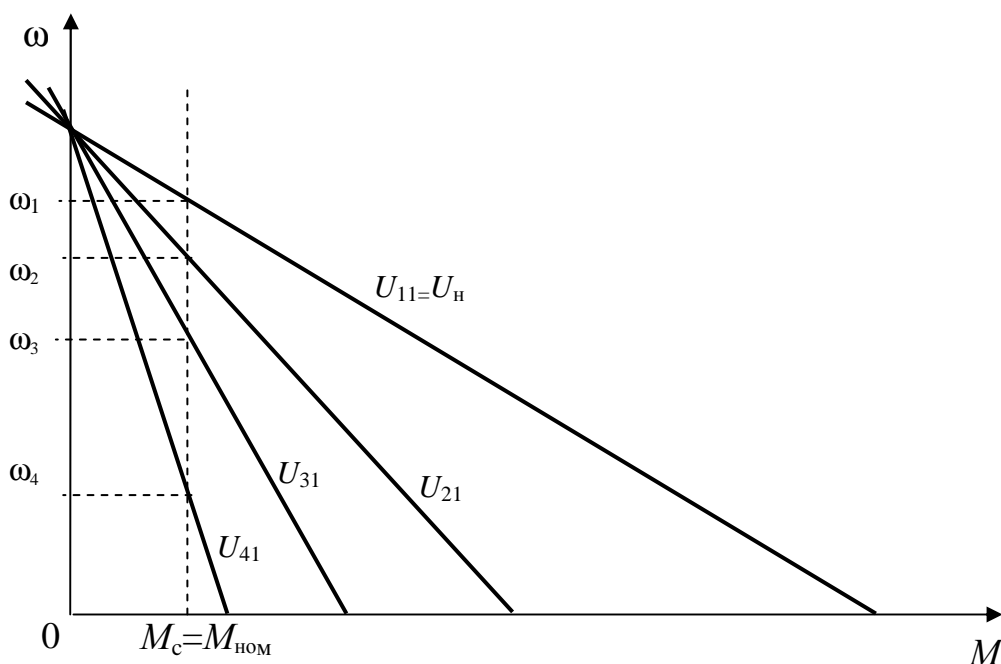


Рисунок 15.11 – Механические характеристики АД при изменении напряжения на статоре и включении активного сопротивления в цепь ротора

Для изменения напряжения при регулировании используют автотрансформаторы, полупроводниковые усилители, тиристорные регуляторы напряжения.

15.3.3 Регулирование асинхронного двигателя совместным изменением частоты и напряжения (частотное регулирование). Наибольший практический интерес представляет частотный способ плавного регулирования частоты вращения. Для наилучшего использования АД при частотном регулировании необходимо, чтобы с изменением частоты изменялось напряжение, подаваемое на статорные обмотки. Закон изменения напряжения зависит от изменения частоты питания и характера нагрузки.

Так, если статический момент сопротивления нагрузки M_c не зависит от частоты вращения, т.е. $M_c(\omega) = \text{const}$, то необходимо при регулировании изменением частоты f_1 так изменять напряжение U_1 , чтобы

$$U_1 / f_1 = \text{const}. \quad (15.14)$$

Если же статический момент сопротивления обратно пропорционален частоте вращения, так что мощность нагрузки $P_{\text{ст}} = M_c \cdot \omega$ остается постоянной, то соотношение U_1 и f_1 должно иметь следующий вид:

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const}.$$

На рисунке 15.12 приведено семейство механических характеристик при изменении частоты напряжения в соответствии с выражением (15.14). С уменьшением частоты $f_{11} < f_{21} < f_{31}$ критическая частота вращения уменьшается. При этом в области высоких и средних частот критический момент

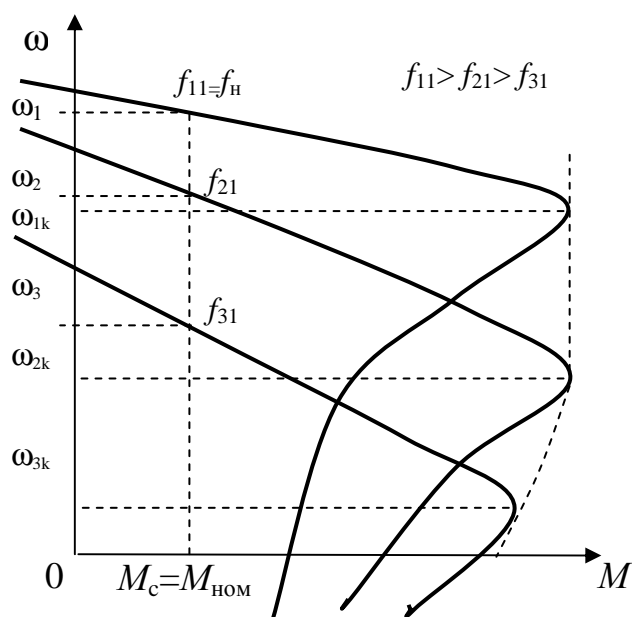


Рисунок 15.12 – Механические характеристики АД при изменении частоты напряжения на статоре

остается неизменным, а в области малых частот несколько уменьшается.

Частотный способ позволяет устанавливать частоту вращения выше и ниже номинальной. Допускается (в основном из условий прочности) увеличение частоты вращения в 1,5–2 раза больше номинальной, а уменьшение в 10–15 раз меньше номинальной. Нижний предел ограничен тем, что технически сложно получить источники питания с низкой частотой, а также добиться достаточно равно-

мерного вращения вала двигателя. Таким образом, частотное регулирование позволяет изменять частоту вращения в диапазоне до $D = (20-30) : 1$. Нижний предел частоты вращения может быть уменьшен с помощью обратных связей по частоте вращения, току и напряжению.

Частотное управление является одним эффективных по технико-экономическим показателям способов управления АД. Рабочая часть механической характеристики обладает высокой жесткостью при любой частоте питания f_1 . *Потери мощности невелики*, так как двигатель всегда работает при малых скольжениях. Плавность регулирования может быть практически любой. Управление можно осуществлять, используя наиболее простой и надежный двигатель с короткозамкнутым ротором.

15.3.4 Регулирование асинхронного двигателя переключением числа пар полюсов. Из выражения

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p \quad (15.15)$$

следует, что при изменении числа пар полюсов p получаются механические характеристики с разной частотой вращения идеального холостого хода ω_0 . Так как значение p определяется целыми числами, то переход от одной характеристики к другой в процессе регулирования носит ступенчатый характер. Существует два способа регулирования скорости изменением числа пар полюсов.

Первый способ. В пазы статора укладываются две обмотки с разным числом полюсов. В зависимости от требуемой частоты вращения к источнику питания подключается та или иная обмотка.

Второй способ. Обмотку каждой фазы составляют из двух частей, которые в процессе регулирования соединяют последовательно или параллельно. При этом число пар полюсов изменяется в 2 раза.

Промышленность выпускает специальные многоскоростные двигатели, в конструкции которых предусмотрена возможность изменения числа пар полюсов.

На рисунках 15.13 и 15.14 приведены схемы переключения с одинарной звезды на двойную звезду и с треугольника на двойную звезду. Переключение одинарной звезды на двойную (рис. 15.13) используют в случае, когда *момент нагрузки рабочего механизма не зависит от частоты вращения* (рис. 15.15, а), т. е. $M_c(\omega) = \text{const}$.

Переключение с треугольника на двойную звезду (см. рис. 15.14) используют, когда *мощность нагрузки рабочего механизма не зависит от частоты вращения* (рис. 15.15, б), т. е. $P_{ct}(\omega) = \text{const}$, а момент сопротивления изменяется обратно пропорционально частоте вращения.

Траектория перехода рабочей точки двигателя при переключениях обмотки статора показана на рисунке 15.15, а пунктирной и сплошной линия-

ми со стрелками. Переход с высшей частоты вращения на низшую сопровождается работой двигателя в генераторном режиме с отдачей энергии в сеть.

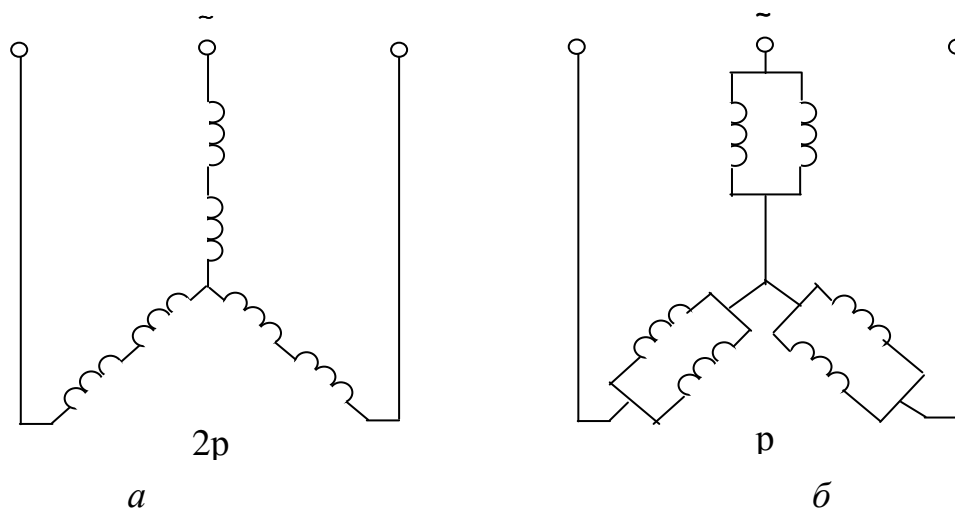


Рисунок 15.13 – Схема переключения обмоток статора с одинарной звезды на двойную

Основным недостатком регулирования изменением числа пар полюсов *является ступенчатый характер* изменения частоты вращения. В то же время регулирование экономично, имеет высокую стабильность частоты вращения и используется в основном для асинхронного короткозамкнутого двигателя. В гибких автоматизированных производствах оно применяется для ряда металлорежущих станков, что позволяет уменьшить количество механических передач в коробках скоростей.

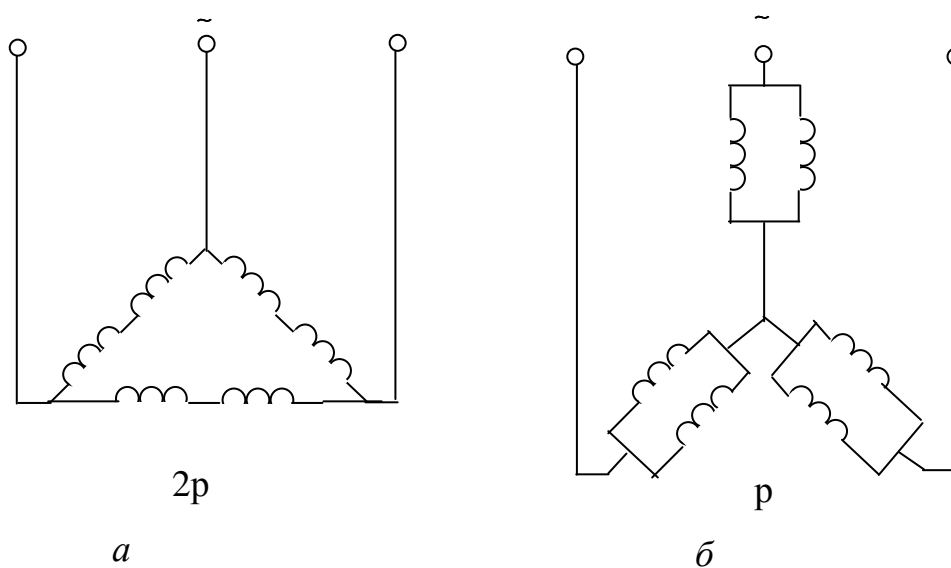


Рисунок 15.14 – Схема переключения обмоток статора с треугольника на двойную звезду

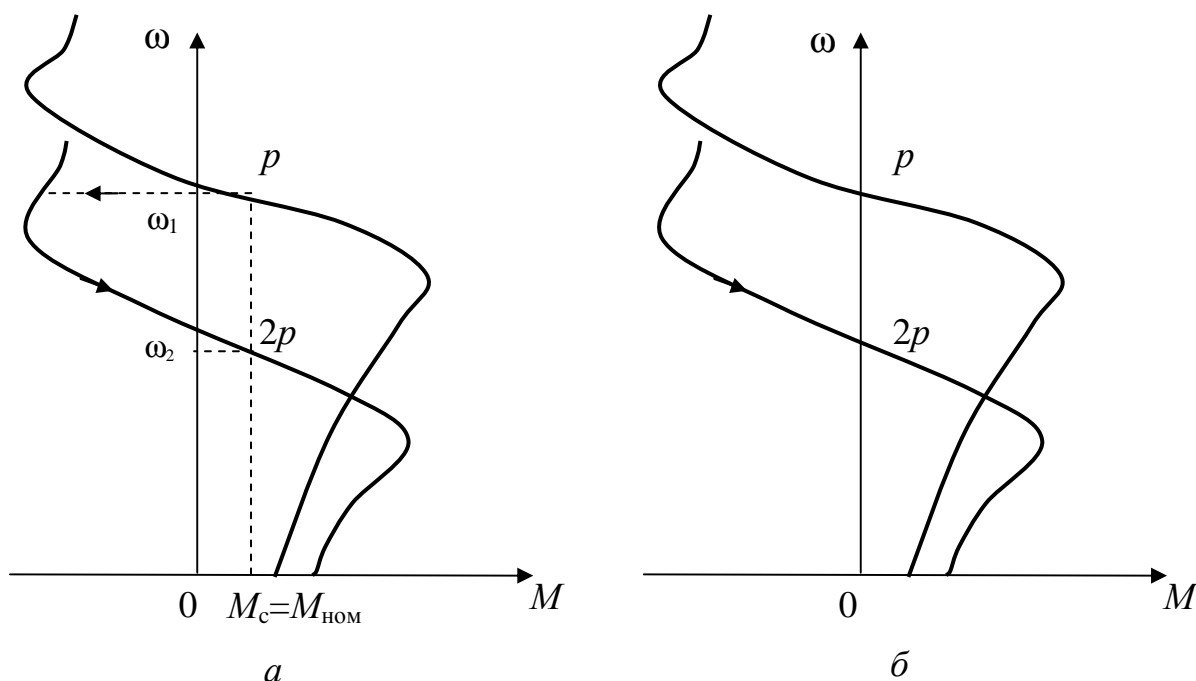


Рисунок 15.15 – Механические характеристики АД при переключении обмотки статора с одинарной звезды на двойную (а) и с треугольника на двойную звезду (б)

Выводы

1. Регулированием скорости называется принудительное изменение скорости электропривода в зависимости от требований технологического процесса. Регулирование скорости осуществляется управляющим воздействием на приводной двигатель.

2. Основными показателями, характеризующими регулирование скорости электроприводов, являются: диапазон регулирования; плавность; экономичность; стабильность скорости; направление регулирования скорости; допустимая нагрузка.

3. Диапазон регулирования угловой скорости - это отношение установившихся максимальной скорости к минимальной при заданной точности регулирования для установленных пределов изменения момента нагрузки и других возмущений.

4. Скорость электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением можно регулировать изменением тока возбуждения, изменением сопротивления цепи якоря и изменением подводимого к якорю электродвигателя напряжения.

5. Скорость асинхронного электродвигателя регулируют изменением добавочного сопротивления в цепи ротора, изменением напряжения подводимого к статору, совместным изменением частоты и напряжения питания, переключением числа полюсов обмотки статора двигателя. Наиболее часто скорость трехфазных асинхронных электродвигателей регулируют изменением добавочного сопротивления в цепи ротора (реостатное регулирование) либо изменением напряжения, подводимого к статору, а также совместным

изменением частоты и напряжения питания (частотный способ). Кроме того, используют переключение числа полюсов обмотки статора двигателя.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под регулированием скорости электропривода?
2. Охарактеризуйте основные показатели регулирования угловой скорости электроприводов.
3. Какие методы используются для регулирования угловой скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением?
4. В каком направлении осуществляют регулирование скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением путем изменения тока возбуждения? Поясните, почему.
5. В каком диапазоне регулируется скорость двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении тока возбуждения? Чем он ограничивается?
6. В каком направлении осуществляют регулирование скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением путем реостатного регулирования? Поясните, почему.
7. В какую цепь включается добавочное сопротивление при регулировании скорости потоком возбуждения и при реостатном регулировании?
8. Как определяется скважность управляющих импульсов ϵ ? На что она влияет?
9. Как расположены регулировочные характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении напряжения на якоре?
10. Чем ограничивается диапазон регулирования скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при изменении напряжения на якоре?
11. Какие методы используются для регулирования угловой скорости асинхронного двигателя?
12. Чем ограничивается диапазон регулирования скорости асинхронного двигателя при реостатном регулировании?
13. Чем ограничивается плавность регулирования скорости асинхронного двигателя при реостатном регулировании?
14. Охарактеризуйте особенности регулирования скорости асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре.
15. С какой целью при регулировании скорости асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре в цепь ротора вводят постоянное сопротивление?

Раздел VI. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК, ПРЕДПРИЯТИЙ И ЗДАНИЙ

16 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК

Ключевые понятия: сварка, электродуговая сварка, автоматическая сварка, сварочный генератор, сварочный аппарат, контактная сварка

16.1 Виды электрической сварки

Сваркой называется процесс получения неразъемного соединения материалов путем местного нагрева свариваемых кромок деталей до пластического или расплавленного состояния.

Электрическая сварка получила широкое применение в строительстве, так как сварные швы обладают высоким качеством и большой прочностью. Прочность сварного соединения обеспечивается атомарными или молекулярными связями. Важное значение имеет при этом взаимная диффузия атомов свариваемых материалов.

В электросварке используется явление электрической дуги, которая представляет собой электрический разряд, сопровождающийся высокой температурой и значительной плотностью тока, которая может достигать нескольких тысяч ампер на 1 см^2 . Падение напряжения на дуге незначительно (10–20 В).

Современная сварочная техника располагает большим разнообразием способов сварки. В настоящее время наибольшее распространение получили два способа электрической сварки: дуговая и контактная.

Электродуговая сварка, при которой расплавление металла свариваемых кромок деталей и электрода (или присадочного металла) производится за счет тепла, выделяемого электрической дугой, выполняется вручную, полуавтоматически и автоматически.

Ручная дуговая сварка может производиться двумя способами: способом Бенардоса и способом Славянова.

Сварку по способу русского изобретателя Н. Н. Бенардоса (рис. 16.1) осуществляют следующим образом. Положительный полюс источника постоянного тока подсоединяется к свариваемым деталям, а отрицательный – к неплавящемуся электроду Э. Между электродом Э (угольным, графитовым или вольфрамовым) и изделием возбуждают электрическую дугу. Кромки изделия и вводимый в зону дуги присадочный материал М нагревают до плавления и получают ванночку расплавленного металла. После затвердевания ванночки образуется сварной шов. Данный способ исполь-

зуются, как правило, при сварке цветных металлов или их сплавов, а также при наплавке твердых сплавов.

Сварку по способу Н. Г. Славянова (рис. 16.2) выполняют с помощью плавящегося электрода. Электрическая дуга возбуждается между металлическим (плавящимся) электродом и свариваемыми кромками изделия. Получается общая ванна расплавленного металла, которая, охлаждаясь, образует сварной шов.

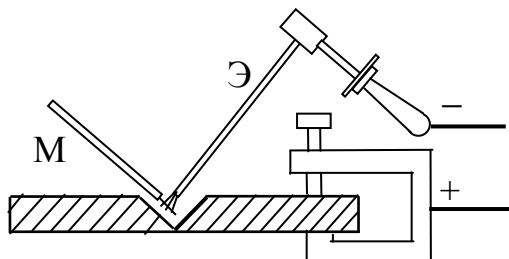


Рисунок 16.1 – Электросварка по способу Бенардоса

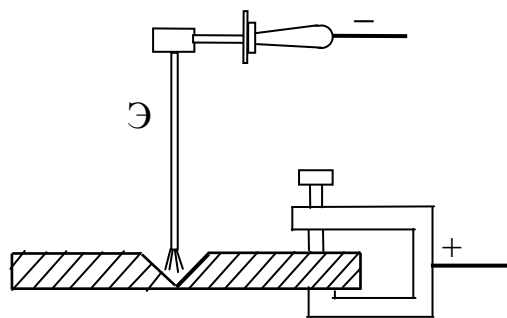


Рисунок 16.2 – Электросварка по способу Славянова

По способу Славянова, получившему наибольшее распространение, возможно применение и переменного тока при условии покрытия стержневого электрода специальной обмазкой. В обмазках электродов и в составе флюсов, которыми покрывают место сварки, содержится значительное количество элементов, имеющих низкую температуру ионизации и, следовательно, повышающих устойчивость электрической дуги.

Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом осуществляется путем механизации основных движений, выполняемых сварщиком, - подачи электрода вдоль его оси в зону дуги и перемещения его вдоль свариваемого шва.

При полуавтоматической сварке механизирована подача электрода вдоль его оси в зону дуги, а перемещение электрода вдоль свариваемого шва производит сварщик вручную. При автоматической сварке механизированы все операции, необходимые для процесса сварки.

Расплавленный металл защищен от воздействия кислорода и азота воздуха специальным гранулированным флюсом. Высокая производительность и хорошее качество швов обеспечили широкое применение автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом.

Электрическая контактная сварка производится при помощи тепла, выделяемого током при прохождении через свариваемые кромки изделия. При этом в месте соприкосновения кромок выделяется наибольшее количество тепла, разогревающее их до сварочного состояния. Завершается сварка последующим сдавливанием свариваемых кромок.

16.2 Основные требования к источникам питания сварочной дуги

Электродуговая сварка начинается с короткого замыкания сварочной цепи - контакта между электродом и деталью. При этом происходит выделение теплоты и быстрое разогревание места контакта. Эта начальная стадия требует повышенного напряжения сварочного тока.

В процессе сварки при переходе каплевого электрода в сварочную ванну происходят очень частые короткие замыкания сварочной цепи. Вместе с этим изменяется длина сварочной дуги. При каждом коротком замыкании напряжение падает до нулевого значения. Для последующего восстановления дуги необходимо напряжение порядка 25–30 В. Такое напряжение должно быть обеспечено за время не более 0,05 с, чтобы поддержать горение дуги в период между короткими замыканиями.

Следует учесть, что при коротких замыканиях сварочной цепи развиваются большие токи (токи короткого замыкания), которые могут вызвать перегрев в проводке и обмотках источника тока. Эти условия процесса сварки в основном и определили требования, предъявляемые к источникам питания сварочной дуги. Для обеспечения устойчивого процесса сварки источники питания дуги должны удовлетворять следующим требованиям.

1. Напряжение холостого хода должно быть достаточным для легкого возбуждения дуги и в то же время не должно превышать нормы техники безопасности. Для однопостовых сварочных генераторов напряжение холостого хода не должно быть более 80 В, а для многопостовых – не более 60 В. Для сварочных трансформаторов установлено наибольшее допустимое напряжение 70 В при сварочной силе тока более 200 А и напряжение 100 В при сварочной силе тока менее 100 А.

2. Напряжение горения дуги (рабочее напряжение) должно быстро устанавливаться и изменяться в зависимости от длины дуги, обеспечивая устойчивое горение сварочной дуги. С увеличением длины дуги напряжение должно быстро возрастать, а с уменьшением – быстро падать. Время восстановления рабочего напряжения, составляющего от 0 до 30 В, после каждого короткого замыкания (при капельном переносе металла от электрода к свариваемой детали) должно быть менее 0,05 с.

3. Значение силы тока короткого замыкания не должно превышать сварочное значение силы тока более чем на 40–50%. При этом источник тока должен выдерживать продолжительные короткие замыкания сварочной цепи. Это условие необходимо для предохранения обмоток источника тока от перегрева и повреждения.

4. Мощность источника тока должна быть достаточной для выполнения сварочных работ.

Кроме того, необходимы устройства, позволяющие регулировать значение сварочной силы тока в требуемых пределах. Сварочное оборудование должно соответствовать требованиям ГОСТов.

16.3 Сварочные преобразователи постоянного тока

Сварочные преобразователи постоянного тока подразделяют на следующие группы:

По количеству питаемых постов – однопостовые, предназначенные для питания одной сварочной дуги; многопостовые, питающие одновременно несколько сварочных дуг.

По способу установки – стационарные, устанавливаемые неподвижно на фундаментах; передвижные, монтируемые на тележках.

По роду двигателей, приводящих генератор во вращение, – машины с электрическим приводом; машины с двигателем внутреннего сгорания (бензиновым или дизельным).

По способу выполнения – однокорпусные, в которых генератор и двигатель вмонтированы в единый корпус; отдельные, в которых генератор и двигатель установлены на единой раме, а привод осуществляется через специальную соединительную муфту.

Наибольшее распространение в строительстве получили однопостовые генераторы с расщепленными полюсами, работающие по принципу использования магнитного потока якоря для получения падающей внешней характеристики.

На рисунке 16.3 показана схема сварочного генератора такого типа. Генератор имеет четыре основных и два дополнительных полюса. При этом одноименные основные полюсы расположены рядом, составляя как бы один раздвоенный полюс.

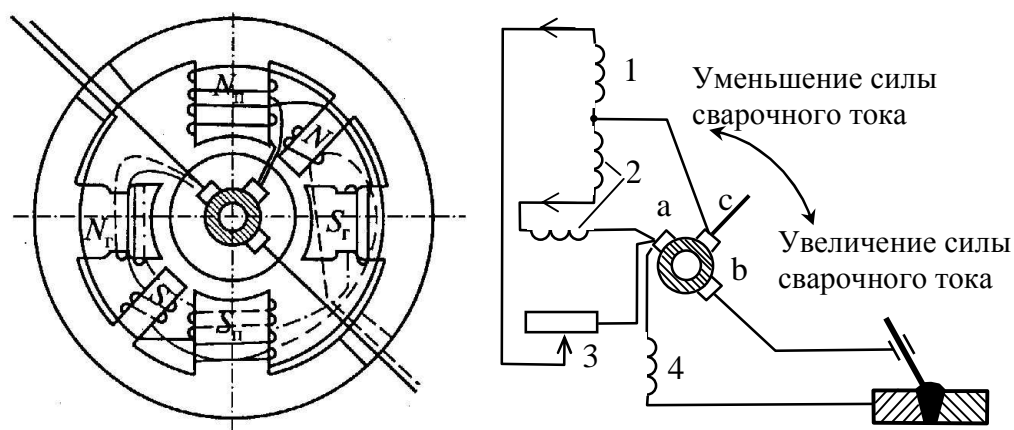


Рисунок 16.3 – Схема генератора с расщепленными обмотками:

1, 2 – соответственно регулируемая и нерегулируемая обмотки возбуждения; 3 – реостат; 4 – серия обмотка; a, b, c – щетки

Обмотки возбуждения имеют две секции – нерегулируемую 2 и регулируемую 1. Нерегулируемая обмотка расположена на всех четырех основных полюсах, а регулируемая помещена только на поперечных полюсах генератора. В цепь регулируемой обмотки возбуждения включен ре-

стат 3. На дополнительных полюсах расположена серийная обмотка 4. По нейтральной линии симметрии между разноименными полюсами на коллекторе генератора расположены основные щетки a и b , к которым подключается сварочная цепь. Дополнительная щетка c служит для питания обмоток возбуждения. Грубое регулирование производится смещением щеточной траверсы, на которой расположены все три щетки генератора. Если сдвигать щетки по направлению вращения якоря, то размагничивающее действие потока якоря увеличивается, и величина сварочной силы тока уменьшается. При обратном сдвиге размагничивающее действие уменьшается, и сварочная сила тока увеличивается. Более плавное и точное регулирование силы тока производят реостатом, включенным в цепь обмотки возбуждения. Увеличивая или уменьшая реостатом силу тока возбуждения в обмотке поперечных полюсов, изменяют магнитный поток Φ_d , тем самым изменяются напряжение тока генератора и величина сварочного тока.

Кроме генераторов с размагничивающим действием реакции якоря применяют сварочные генераторы, у которых падающая внешняя характеристика и ограничение величины силы тока короткого замыкания обеспечивается размагничивающим действием последовательной обмотки возбуждения, включенной в сварочную цепь. Принципиальная схема такого генератора представлена на рисунке 16.4. Генератор имеет две обмотки: обмотку возбуждения и размагничивающую обмотку 2. Обмотка возбуждения питается либо от основной и дополнительной щеток, либо от специального: источника тока с постоянным напряжением. Поэтому магнитный поток Φ_v , создаваемый этой обмоткой, постоянный и не зависит от нагрузки генератора. Размагничивающая обмотка включена последовательно с обмоткой якоря так, что при горении дуги сварочный ток, проходя через обмотку, создает магнитный поток Φ_n , направленный против потока Φ_v .

В последнее время большое применение в сварочном производстве получили выпрямительные сварочные установки. Они преобразуют переменный ток в постоянный при помощи селеновых, германиевых или кремниевых выпрямителей.

Выпрямительные установки имеют более высокий КПД. Кроме того, следует отметить такие важные их преимущества, как отсутствие вращающихся частей, малую массу, небольшие габариты и дешевизна. Важным преимуществом являются также их высокие динамические свойства вследствие меньшей электромагнитной инерции. Сила тока и напряжение при изменении режима работы сварочной цепи изменяются практически мгновенно. Трехфазная мостовая система выпрямления обеспечивает меньшую пульсацию выпрямленного тока и более равномерную нагрузку фаз силовой сети переменного тока.

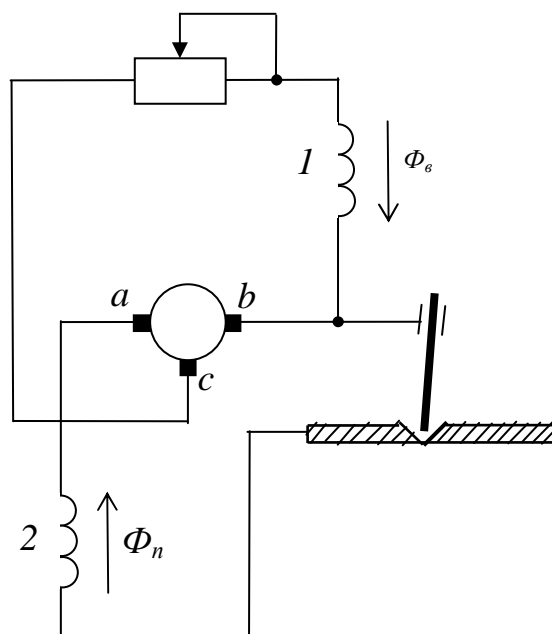


Рисунок 16.4 – Сварочный генератор с размагничивающим действием реакции якоря:
1 – обмотка возбуждения; 2 – размагничивающая обмотка; a, b, c – щетки

16.4 Сварочные аппараты переменного тока

Применяемые на заводах и на строительном-монтажных площадках сварочные аппараты переменного тока подразделяют на четыре основные группы:

1. С отдельным дросселем типа СТЭ.
2. Со встроенным дросселем типа СТН и ТСД.
3. С подвижным магнитным шунтом типа СТАН.
4. С увеличенным магнитным рассеянием и подвижной обмоткой типа ТС и ТСК.

Эти группы отличаются по конструкции и по электрической схеме. Сварочные аппараты состоят из понижающего трансформатора и специального устройства. Трансформатор обеспечивает питание дуги переменным током напряжением 60–70 В, а специальное устройство служит для создания падающей внешней характеристики и регулирования величины сварочного тока.

Сварочные аппараты с отдельным дросселем (рис. 16.5) состоят из понижающего трансформатора и дросселя. Трансформатор Т имеет сердечник (магнитопровод) 2 из штампованных пластин, изготовленных из тонкой трансформаторной стали толщиной 0,5 мм. На сердечнике расположены первичная 1 и вторичная 3 обмотки. Первичная обмотка из изолированной проволоки подключается к сети переменного тока напряжением 220 или 380 В. Во вторичной обмотке, изготовленной из медной шины, индуцируется ток напряжением 60–70 В. Небольшое магнитное рассеива-

ние и малое омическое сопротивление обмоток обеспечивают незначительное внутреннее падение напряжения и высокий КПД трансформатора.

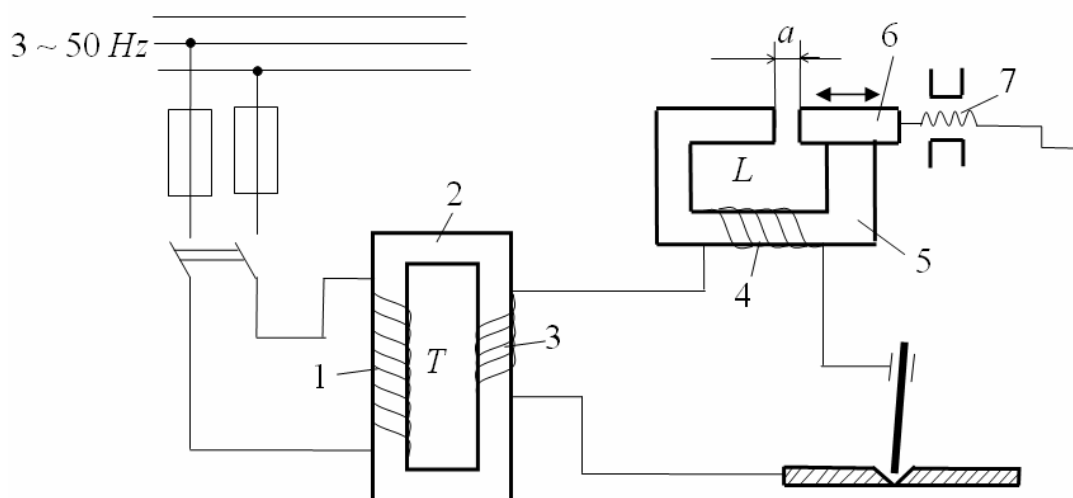


Рисунок 16.5 – Схема сварочного трансформатора с отдельным дросселем:
 1, 3 – соответственно первичная и вторичная обмотки; 2 – сердечник;
 L – обмотка дросселя; 4, 5 – соответственно неподвижная и подвижная
 части сердечника; 6 – винтовое приспособление; a – зазор

Последовательно вторичной обмотке в сварочную цепь включена обмотка 4 дросселя D_p (регулятора тока). Сердечник (магнитопровод) дросселя набран из пластин тонкой трансформаторной стали и состоит из двух частей: неподвижной 5, на которой расположена обмотка дросселя, и подвижной 6, перемещаемой с помощью винтового приспособления 7.

Дроссель предназначен для регулирования сварочной силы тока и создания падающей внешней характеристики трансформатора на дуге. При возбуждении дуги (при коротком замыкании) большой ток, проходя через обмотку дросселя, создает мощный магнитный поток, наводящий ЭДС дросселя, направленную против напряжения трансформатора. Вторичное напряжение, развиваемое трансформатором, полностью поглощается падением напряжения в дросселе. Напряжение в сварочной цепи почти достигает нулевого значения.

При возникновении дуги сварочная сила тока уменьшается. Вслед за этим уменьшается ЭДС самоиндукции дросселя, направленная против напряжения трансформатора, и в сварочной цепи устанавливается рабочее напряжение, необходимое для устойчивого горения дуги, меньшее, чем напряжение холостого хода. Изменяя величину зазора a между неподвижным и подвижным магнитопроводом, изменяют индуктивное сопротивление дросселя и тем самым силу тока в сварочной цепи. При увеличении зазора магнитное сопротивление магнитопровода дросселя увеличивается, магнитный поток ослабевает, уменьшается ЭДС самоиндукции катушки и ее индуктивное сопротивление. Это приводит к возрастанию сварочной силы тока. При уменьшении зазора сварочная сила тока уменьшается.

По этой схеме изготовлены и эксплуатируются сварочные трансформаторы типа СТЭ. Такие трансформаторы широко применяются на строительномонтажных площадках, на заводах и при сварке магистральных трубопроводов.

Сварочные аппараты со встроенным дросселем (рис. 16.6). Магнитопровод трансформатора состоит из основного сердечника 7, на котором расположены первичная и вторичная 6 обмотки собственно трансформатора, и добавочного сердечника 4 с обмоткой дросселя 5 (регулятор силы тока). Добавочный магнитопровод расположен над основным и состоит из неподвижной и подвижной частей, между которыми при помощи винтового механизма 3 устанавливается необходимый воздушный зазор a .

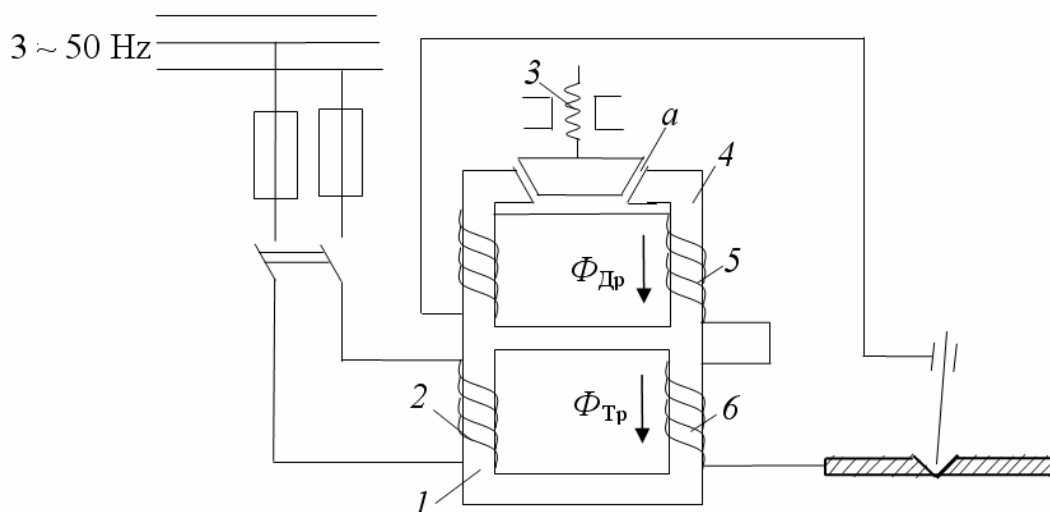


Рисунок 16.6 – Схема сварочного трансформатора со встроенным дросселем:
1 – сердечник; 2, 6 – обмотки трансформатора соответственно первичная и вторичная; 3 – винтовой механизм; 4 – добавочный сердечник; 5 – обмотка дросселя; a – зазор

Регулирование сварочной силы тока производится изменением воздушного зазора a . Чем больше зазор a , тем больше сварочная сила тока.

Сварочные аппараты с подвижным магнитным шунтом (рис. 16.7) имеют целый замкнутый магнитопровод, у которого на одном стержне расположены первичная 4 и вторичная 3 обмотки, а на другом – реактивная обмотка 1. Между ними находится стержень – магнитный шунт 2. Шунт замыкает магнитные потоки, создаваемые первичной и реактивной обмотками. При этом образуются магнитные потоки рассеяния, которые создают значительное индуктивное сопротивление. Таким образом обеспечивается падающая внешняя характеристика трансформатора.

Регулирование сварочной силы тока производится перемещением магнитного шунта вдоль направления магнитного потока. При выдвигании шунта рассеяние магнитных потоков первичной и реактивной обмоток

уменьшается, вследствие чего уменьшается индуктивное сопротивление трансформатора. При этом значение сварочной силы тока возрастает.

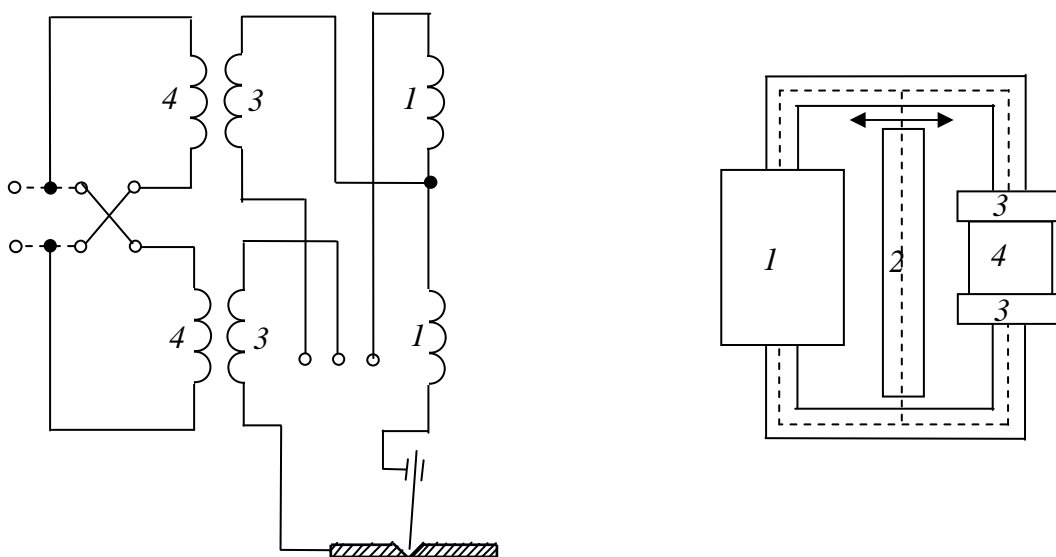


Рисунок 16.7 – Схема сварочного аппарата с подвижным магнитным шунтом:
1 – реактивная обмотка; 2 – магнитный шунт; 3, 4 – обмотки соответственно
вторичная и первичная

Сварочные аппараты с увеличенным магнитным рассеянием и подвижной обмоткой без дросселя. Трансформатор имеет магнитопровод в виде стержней, на которых расположены по две катушки: одна с первичной обмоткой, а вторая со вторичной обмоткой. Катушки обмоток соединены параллельно. Первичная катушка закреплена неподвижно. Катушка вторичной обмотки перемещается винтовым механизмом вручную. Регулирование сварочной силы тока осуществляется путем изменения расстояния между катушками первичной и вторичной обмоток трансформатора. Чем меньше расстояние между катушками обмоток, тем больше сварочная сила тока. По этому принципу изготовлены трансформаторы типа ТС и ТСК с алюминиевыми обмотками.

Трехфазные сварочные трансформаторы применяют при сварке трехфазной дугой спаренными электродами. Применение трехфазных сварочных аппаратов имеет большое экономическое значение, так как они обеспечивают высокую производительность, экономию электроэнергии (КПД достигает 0,9) и равномерную загрузку фаз сети при высоком коэффициенте мощности ($\cos\varphi \leq 0,8$). Однако сварка трехфазным током получила ограниченное применение из-за сложности сварочного оборудования и непригодности для сварки в потолочном и вертикальном положениях.

16.5 Установки контактной сварки

Контактная сварка, или сварка под давлением, представляет собой способ сварки деталей, при котором концентрированное выделение теплоты в области стыка обуславливается значительным превыше-

нием активного сопротивления в этом месте над сопротивлением самих деталей. Количество выделяющейся теплоты в месте стыка определяется по известной формуле

$$Q = 0,24 I^2 R_{\pi} t, \quad 16.1)$$

где R_{π} – переходное сопротивление в месте стыка.

К установкам контактной сварки относятся устройства стыковой, точечной и роликовой сварки, схемы работы которых показаны на рис. 16.8. Они нашли широкое применение в строительстве, в частности для сварки арматуры и металлических конструкций.

Наибольшая мощность машин промышленного изготовления, предназначенных для контактной сварки, достигает 750 кВА. Эти машины позволяют сваривать заготовки сечением до 3500 мм² и детали толщиной до 32 мм.

Для контактной сварки можно использовать как постоянный, так и переменный ток. Однако на практике преимущественно применяют переменных ток. Это связано с тем, что ток величиной в тысячи ампер при напряжении в несколько вольт, требуемые при сварке, можно просто получить на переменном токе с помощью трансформаторов.

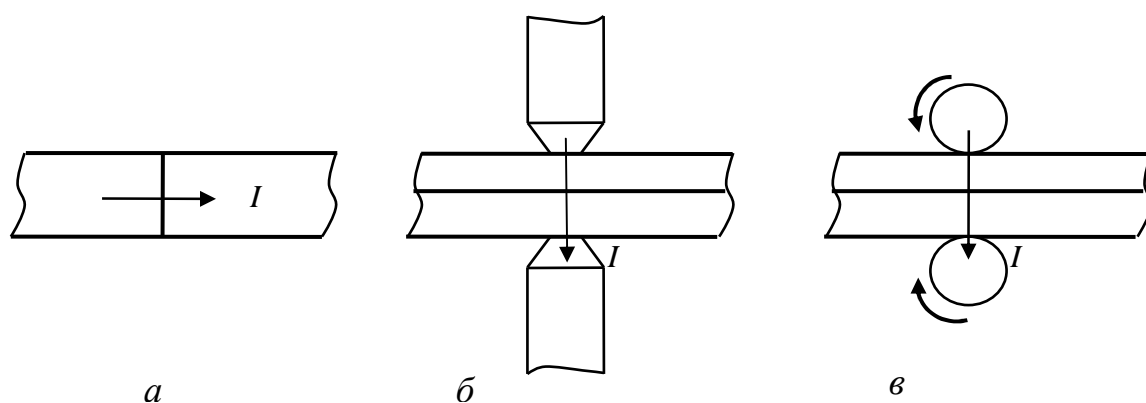


Рисунок 16.8 – Основные способы контактной сварки

Подача сварочного тока может быть либо непрерывной (в некоторых случаях при роликовой сварке), либо прерывной.

Значительную длительность тока поддерживают реле времени, а включение и выключение сварочного тока выполняется тиристорами.

Выводы

1. При электродуговой сварке расплавление металла свариваемых кромок деталей и электрода или присадочного металла осуществляется за счет тепла, выделяемого электрической дугой.

2. Электродуговая сварка начинается с короткого замыкания сварочной цепи, вызывающего выделение теплоты и быстрый разогрев места кон-

такта. Эта стадия сварки требует повышенного напряжения, приводящего к большим токам в сварочной цепи (токам короткого замыкания), которые могут вызвать перегрев в проводке и обмотках источника тока.

3. В строительстве применяются сварочные установки постоянного и переменного тока.

4. Преимуществами сварочных выпрямителей на постоянном токе являются более высокий КПД, отсутствие вращающихся частей, малая масса и габариты, дешевизна.

5. Трехфазные сварочные аппараты обеспечивают экономию электроэнергии, равномерную загрузку фаз сети, высокий коэффициент мощности $\cos\varphi$.

6. При полуавтоматической сварке механизирована подача электрода вдоль его оси в зону дуги, а перемещение электрода вдоль свариваемого шва производит сварщик вручную. При автоматической сварке механизированы все операции, необходимые для процесса сварки.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните, в чем состоит и как протекает процесс сварки?
2. Чем характеризуются автоматическая и полуавтоматическая сварка?
3. Сформулируйте основные требования к источникам питания сварочной дуги? Чем обусловлены эти требования?
4. Объясните конструкцию сварочного генератора постоянного тока.
5. Объясните принцип работы сварочного трансформатора с отдельным дросселем.
6. Как работает сварочный трансформатор со встроенным дросселем?
7. Чем характеризуются установки контактной сварки?
8. Как и по каким признакам классифицируют сварочные преобразователи постоянного тока?
9. Охарактеризуйте достоинства и недостатки выпрямительных сварочных установок.
10. Как и по каким признакам классифицируют сварочные аппараты переменного тока?
11. Охарактеризуйте назначение и особенности установок контактной сварки. Для каких видов сварки их применяют?

17 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Ключевые понятия: подъемно-транспортная машина, крановые электродвигатели, аппаратура управления, контроллер, командоконтроллер, контактор, магнитный пускатель, реле времени, промежуточное реле, реле минимального тока, реле максимального тока, тепловое реле.

17.1 Общие сведения о подъемно-транспортных машинах

К подъемно-транспортным машинам (ПТМ), наиболее часто используемым в строительстве и на предприятиях строительной индустрии, относятся стреловые, башенные, козловые, мостовые и другие краны, а также подъемники различного назначения. Электрооборудование этих машин имеет сходные конструктивные особенности и назначение.

Работа электрооборудования ПТМ характеризуется следующими особенностями:

- режим работы - повторно-кратковременный;
- частые изменения направления вращения (реверс);
- необходимость регулирования частоты вращения привода;
- значительные перегрузки, вибрация;
- затрудненный доступ для обслуживания и ремонта;
- работа в условиях загрязненности, влажности, значительного перепада температур.

Для обеспечения перечисленных условий работы электрооборудование ПТМ должно отвечать требованиям повышенной прочности, высококачественной изоляцией и надежной защитой от действий окружающей среды. Этим требованиям отвечают машины и аппараты специального кранового исполнения. *Электрооборудование ПТМ по назначению подразделяется на **основное** (оборудование электропривода) и **вспомогательное** (оборудование рабочего и ремонтного освещения и отопления).*

К основному электрооборудованию относятся:

- электродвигатели;
- аппараты управления электродвигателями - контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, магнитные пускатели, реле управления;
- аппараты регулирования частоты вращения электродвигателей - пускорегулирующие реостаты, тормозные машины;
- аппараты управления тормозами - тормозные электромагниты и электрогидравлические толкатели;
- аппараты электрической защиты - защитные панели, автоматические выключатели, максимальные и тепловые реле, предохранители, распределительные ящики и аппараты, обеспечивающие максимальную и нулевую защиту электродвигателей;

аппараты механической защиты - конечные выключатели и ограничители грузоподъемности, обеспечивающие защиту крана и его механизмов от перехода крайних положений и перегрузки;

полупроводниковые выпрямители, обеспечивающие питание обмоток возбуждения тормозных машин, обмоток магнитных усилителей, силовых цепей и цепей управления некоторых типов кранов;

генераторы переменного и постоянного тока, применяемые на некоторых типах башенных кранов в качестве источников питания для всего электрооборудования или электрооборудования приводов отдельных механизмов;

аппараты и приборы, используемые для различных переключений и контроля в силовых цепях и цепях управления: кнопки, рубильники, выключатели, переключатели, измерительные приборы.

К вспомогательному оборудованию относятся:
осветительные приборы (светильники, прожекторы);
приборы электрообогрева (электроды, нагреватели);
приборы звуковой сигнализации (звонки, сирены);
аппараты управления и защиты (трансформаторы, выключатели, предохранители и т. д.), установленные в цепях освещения и отопления.

17.2 Электродвигатели подъемно-транспортных машин

На ПТМ применяются электрические машины как постоянного, так и переменного тока. Устройство и принцип работы электрических машин постоянного тока были рассмотрены в подразделе 10.1, машин переменного тока – в подразделе 11.2. В данном разделе рассмотрим особенности электродвигателей ПТМ.

17.2.1 Крановые электродвигатели. Электродвигатели специального кранового типа предназначены для работы как в помещении, так и на открытом воздухе. Поэтому их выполняют закрытыми, с самовентиляцией (асинхронные двигатели) или с независимой вентиляцией (двигатели постоянного тока) и с влагостойкой изоляцией. Так как двигатели рассчитаны на тяжелые условия работы, их изготавливают повышенной прочности. Все крановые электродвигатели характеризуются повышенной перегрузочной способностью, большими пусковыми моментами при сравнительно небольших пусковых токах и малой длительности разгона. Отношение пусковых моментов к номинальным колеблется в пределах 2,3–3,2.

Крановые электродвигатели с контактными кольцами единой серии МТФ, МТН, 4МТН и с короткозамкнутыми кольцами, 4МТКФ предназначены для привода механизмов, работа которых характеризуется кратковременным и повторно-кратковременным режимами. Серии электродвигателей 4-й разработки по сравнению с МТФ и МТКФ рассчитаны на высокую температуру нагрева и отличаются от них меньшими габаритами и массой.

Крановые асинхронные электродвигатели имеют обозначение, состоящее из букв и цифр: МТ - с фазным ротором, МТК - с короткозамкнутым ротором. Класс нагревостойкости двигателя обозначается буквой. Двигатели с индексом В (МТВ и МТКВ) имеют нагревостойкую изоляцию класса В с допустимой температурой нагревостойкости 130°С. Двигатели с индексом Р (МТР и МТКР) имеют нагревостойкую изоляцию класса Р с температурой нагревостойкости 155°С. Двигатели МТ и МТК выполняют с изоляцией класса Е, с допустимой температурой нагревостойкости 120°С.

Первая цифра трехзначного числа (0–7) после буквенного обозначения характеризует условный наружный диаметр статорного пакета, вторая цифра – порядковый номер серии, третья цифра - условную длину сердечника статора. Цифра, стоящая после дефиса, обозначает число полюсов машины. Например, обозначение МТКФ 412-8 означает крановый короткозамкнутый электродвигатель четвертого габарита, первой серии, второй длины, восьмиполюсный. Или МТР-411-8 - крановый электродвигатель с фазным ротором 4-й величины, 1-й длины, восьмиполюсный, с изоляцией класса Р.

К корпусу электродвигателя крепится табличка с основными параметрами, характеризующими двигатель и названием завода-изготовителя. В табличке указывают мощность электродвигателя в кВт при номинальной нагрузке, коэффициент мощности $\cos\phi$, частоту оборотов, напряжение, на которое рассчитан двигатель в случае соединения его обмоток "звездой" или "треугольником", силу тока ротора при номинальном напряжении.

На стреловых кранах в основном используются двигатели с фазным ротором, поскольку в них с помощью реостата, включаемого в цепь ротора, можно регулировать величину пускового тока и пускового момента.

Пусковой момент при некотором пусковом сопротивлении может быть максимальным. Максимальный момент соответствует критическому скольжению и определяется по номинальному моменту и коэффициенту кратности максимального момента. От пускового и максимального моментов зависит способность электродвигателя во время пуска преодолевать инерционные усилия груза и передач исполнительных механизмов.

В случае установившегося режима работы момент, развиваемый на валу двигателя, должен быть всегда больше момента поднимаемого груза. Если момент, передаваемый от груза на вал электродвигателя больше его максимального момента, то двигатель останавливается, поскольку не может преодолеть статический момент. Момент, развиваемый при этом двигателем, будет критическим. Если своевременно не выключить двигатель, который находится под большой нагрузкой, то он перегревается и может сгореть. В связи с этим не следует допускать перегрузки двигателя.

Перегрузочная способность крановых электродвигателей с фазным ротором при ПВ=25% составляет 2,5–3,4.

Работают крановые электродвигатели в повторно-кратковременном режиме: периоды кратковременной работы чередуются с длительными периодами выключенного состояния, в котором двигатель охлаждается. При таком режиме двигатель нагревается меньше, чем при длительной непрерывной работе, поэтому его можно больше нагружать. Допустимая нагрузка двигателя зависит от ПВ и определяется стандартом: 15, 25, 40, 60 и 100% нагрузки, определенной для длительного режима работы.

Электродвигатели ПТМ устанавливают под негерметичными капотами. Поэтому они подвержены воздействию пыли, влажности, высокой и низкой температур. В связи с этим, на ПТМ используются электродвигатели в защищенном исполнении.

17.2.2 Пуск асинхронных электродвигателей ПТМ. Пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором осуществляют с помощью магнитных пускателей. Такой способ возможен при условии, что мощность двигателя не выше 20% мощности источника питания внешней электросети. Пуск мощных короткозамкнутых двигателей осуществляют, переключая статорную обмотку со "звезды" на "треугольник" при напряжении сети 220 В.

Электродвигатели с фазным ротором включаются с помощью контроллеров и пусковых реостатов, включенных в цепь ротора двигателя. Во время пуска сопротивление реостата постепенно уменьшают, увеличивая при этом пусковой момент и частоту вращения двигателя.

Частоту вращения асинхронных двигателей с фазным ротором регулируют, изменяя сопротивление ротора, для чего включают и выключают пусковые реостаты. Ввод в цепь ротора сопротивления уменьшает частоту вращения ротора, а выведение реостата – увеличивает ее. Шунтирование (выведение из цепи) части сопротивления осуществляют контроллером. Регулировать частоту вращения этим способом можно только в случае преодоления двигателем большого момента сопротивления нагрузки (подъем тяжелого груза, поворот с грузом на большом вылете). На холостом ходу с незначительной нагрузкой частота вращения двигателя практически не зависит от сопротивления в цепи ротора и приближается к синхронной. Способ регулирования частоты вращения изменением сопротивления в цепи ротора самый простой, но вместе с этим и самый неэкономичный, в силу больших потерь в пусковом реостате.

Реверс асинхронных двигателей обеспечивается изменением направления вращения магнитного поля. Для одnorазового реверсирования на щитке выводов статора переключают две любые фазы. В случае необходимости периодического изменения направления вращения ротора применяются реверсивные магнитные пускатели, контроллеры или переключающие рубильники.

17.2.3 Электродвигатели постоянного тока. Крановые электродвигатели постоянного тока типов ДК, П и 2П выпускаются на номинальное напряжение 220 и 440 В. В обозначении двигателя (например, ДК-309Б) буквы обозначают серию, а цифры – условные размеры. Первая цифра после названия серии (1–8) – величина двигателя, которая характеризует внешний диаметр стального якорного пакета, вторая цифра – длина пакета для данной величины, третья – длина статорного сердечника, буква после цифр – класс изоляции.

Остальные параметры и конструктивные особенности (напряжение, мощность, частота вращения, способ охлаждения) характеризуются каталожным номером.

17.2.4 Генераторы переменного и постоянного тока. Как уже отмечалось в разделе 4, генераторы преобразуют механическую энергию вращения в электрическую. На строительных кранах используются генераторы переменного (синхронные) и постоянного тока мощностью от 50 до 100 кВт.

Генератор входит в состав силовой установки крана, получая вращение от дизеля через муфту. На электрических кранах постоянного тока в случае питания от внешней сети переменного тока генератор приводится во вращение от электродвигателя, включенного во внешнюю электрическую сеть.

17.3 Элементы аппаратуры управления

Контроллеры служат для управления работой электродвигателя, т. е. его включения, регулирования частоты вращения, остановки и изменения направления движения (реверсирования). Контроллеры, применяемые для управления электродвигателями крановых механизмов, по принципу работы разделяются на два вида:

непосредственного управления, или силовые, замыкающие или размыкающие силовые цепи двигателя при помощи контактных устройств контроллера с ручным приводом;

дистанционного управления, или магнитные, управляемые при помощи командоконтроллеров, переключающих цепи управления.

Силовыми контроллерами, применяемыми на башенных кранах, служат кулачковые контроллеры переменного тока ККТ (рис. 17.1).

Основными узлами кулачкового контроллера являются контактные элементы и вал 5 с кулачковыми шайбами 4. Каждый контактный элемент состоит из основания 1, подвижного рычага 2 с роликом и подвижным контактом и приводной пружины 3, обеспечивающей замыкание подвижного и неподвижного контактов. Контактные элементы крепятся к корпусу 8 контроллера. Вал с кулачковыми шайбами (кулачковый барабан) вращается в

подшипниках, закрепленных в корпусе контроллера. Поворот кулачкового барабана осуществляется с помощью рукоятки 6, насаженной на выступающий конец вала.

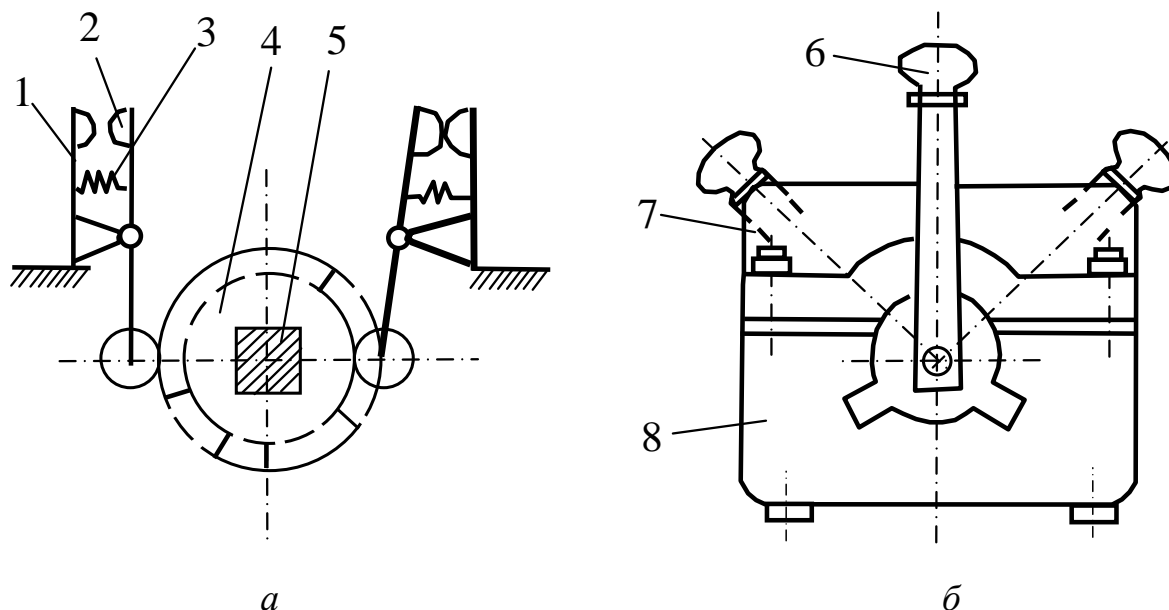


Рисунок 17.1 - Кулачковый контроллер ККТ-61:

а – контактная система; *б* – общий вид; 1 – основание контактного элемента; 2 – подвижный рычаг с роликом и подвижным контактом; 3 – приводная пружина; 4 – кулачковая шайба; 5 – вал; 6 – рукоятка; 7 – крышка; 8 – корпус

Контроллеры выпускают двух видов: контроллеры для управления одним и двумя двигателями.

Магнитные контроллеры представляют собой панель в открытом или защищенном исполнении, на которой размещены контакторы, реле управления, плавкие предохранители и другие аппараты управления и электрической защиты.

Для управления катушками контакторов и реле магнитного контроллера обычно служит **командоконтроллер**. Работы командоконтроллера аналогична работе кулачкового контроллера ККТ, но количество переключаемых цепей у него меньше, а контакты серебряные, мостикового типа.

Магнитные контроллеры обладают рядом преимуществ по сравнению с силовыми:

магнитным контроллером любой мощности управляют с помощью малогабаритного аппарата - командоконтроллера без применения значительного мускульного усилия машиниста;

магнитные контроллеры могут быть установлены вне кабины, в любом месте на кране;

контакторы магнитных контроллеров более износоустойчивы, чем контакты кулачковых контроллеров.

Применение магнитных контроллеров позволяет автоматизировать операции пуска и торможения двигателя, что упрощает управление приводом и предохраняет двигатель от перегрузок.

Однако магнитные контроллеры имеют значительно более сложную схему и большее количество электроаппаратов, чем силовые, и поэтому требуют более тщательного ухода.

Контакторы и магнитные пускатели. *Контактором называется электрический аппарат, предназначенный для включения и выключения силовых электроприемников.* Принцип работы контактора заключается в следующем. При подаче напряжения на катушку электромагнита под его действием замыкаются силовые контакты контактора и осуществляется включение электроприемника. При снятии напряжения с катушки электромагнита, под его действием размыкаются силовые контакты контактора и электроприемник отключается.

В зависимости от рода тока *различают контакторы постоянного и переменного тока.* По числу одновременно переключаемых цепей контакторы разделяют на однополюсные и многополюсные. Контакторы постоянного тока выпускаются одно- и двухполюсными, а контакторы переменного тока - двух-, трех- и четырехполюсными.

Главные контакты делают массивными, рассчитанными на большую силу тока, а блок-контакты – небольшими, так как в цепи управления сила тока не превышает 5-10 А.

При размыкании электрических цепей, находящихся под нагрузкой, между силовыми контактами контактора возникает электрическая дуга, которая вызывает ускоренный износ контактов и даже их разрушение. Для сокращения времени горения дуги применяются различные системы принудительного дугогашения.

Контакторы используют в магнитных контроллерах башенных кранов в качестве линейных контакторов цепи защиты и в реверсорах.

Магнитным пускателем называется малогабаритный контактор специального исполнения, предназначенный для пуска, остановки и реверсирования асинхронных короткозамкнутых электродвигателей, а также для коммутации (замыкания и размыкания) других электрических цепей. Магнитный пускатель может иметь встроенные тепловые реле для защиты электрической цепи от перегрузок.

На башенных кранах пускатели применяют для управления короткозамкнутыми двигателями, в магнитных контроллерах и для коммутации других силовых цепей.

Реле управления и защиты. Для управления и защиты электродвигателей используются реле времени, промежуточные реле, реле минимального тока, реле максимального тока, тепловые реле.

Реле времени применяют в магнитных контроллерах кранов для автоматического замыкания и размыкания цепей управления с заданной выдержкой времени.

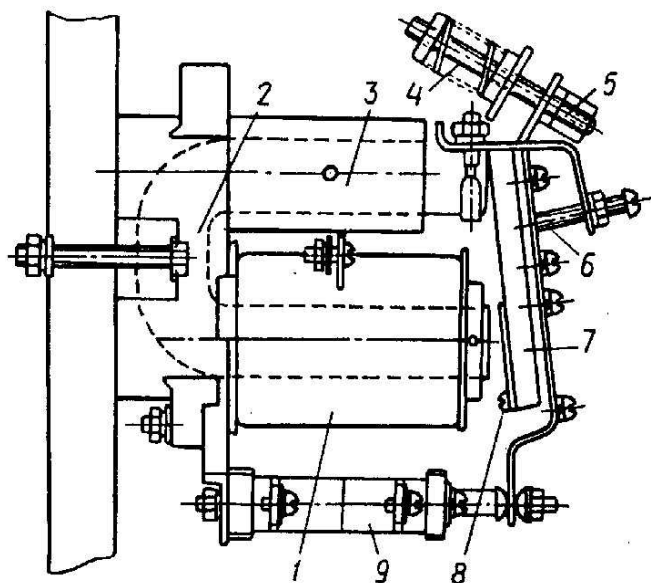


Рисунок 17.2 - Реле времени постоянного тока:
1 – катушка; 2 – ярмо; 3 – гильза; 4 – возвратная пружина; 5 – регулировочная гайка; 6 – упорный винт; 7 – якорь; 8 – немагнитная прокладка; 9 – контактная система

На рисунке 17.2. показано устройство электромагнитного реле времени постоянного тока. Катушка реле укреплена на ярме. К ярму на качающейся призматической опоре закреплен якорь, который в выключенном состоянии удерживается возвратной пружиной.

Работа реле времени основана на том, что в следствие явления самоиндукции, при выключении катушки ток в ней уменьшается постепенно. Когда катушка включается, в магнитной системе реле возникает магнитный поток, под действием которого якорь быстро, без выдержки времени притягива-

ется к ярму. Если катушку закоротить или выключить, то ток, который постепенно уменьшается в обмотке, будет поддерживать магнитный поток реле. В силу этого якорь остается еще некоторое время притянутым к ярму. Когда сила притяжения якоря к ярму станет меньше усилия возвратной пружины, якорь реле под ее действием отойдет от катушки. Время, в течение которого якорь остается притянутым после выключения катушки, называется временем выдержки реле. Поскольку якорь связан с подвижными контактами контактной системы, то контакты размыкаются (или замыкаются) с выдержкой времени. Время выдержки зависит от типа реле, способа выключения катушки и находится в пределах 0,2–0,3 с.

Промежуточное реле применяют в крановых схемах в качестве вспомогательного аппарата, если основной аппарат не обладает достаточным количеством контактов, требуемых для работы схемы, а также, если мощность контактов основного аппарата недостаточна для размыкания или замыкания цепи управления. Устройство промежуточного реле показано на рисунке 17.3.

Промежуточные реле выпускаются с катушками постоянного и переменного тока. Реле содержит от трех до шести контактов. Подвижные контакты реле - мостикового типа. Они закреплены на стержне, соединенном с якорем. Когда на катушку подается напряжение, якорь притягивается к ярму, а связанные с ним мостиковые контакты замыкают или размыкают неподвижные контакты, выполняя требуемые переключения в схеме

управления. Контакты промежуточного реле рассчитаны на наибольшую силу тока (до 20 А) и могут включаться только в цепи управления.

Реле минимального тока. Реле применяют в схеме привода грузовой лебедки с тормозной машиной для контроля силы тока обмотки возбуждения.

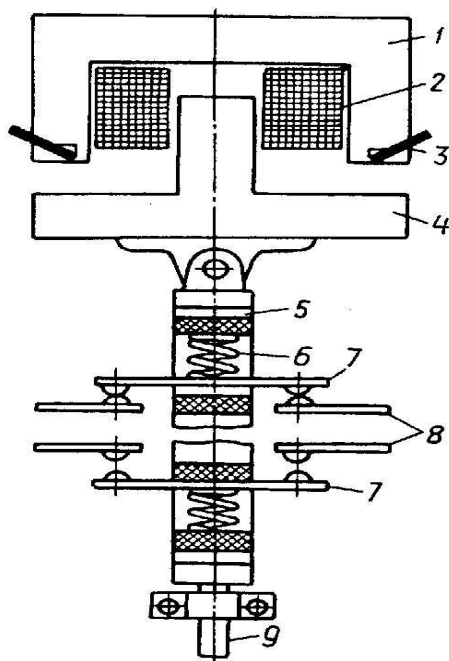


Рисунок 17.3 - Промежуточное реле переменного тока: 1 - ярмо; 2 - катушка; 3 - к.з. виток; 4 - якорь; 5 - изоляционная рейка; 6 - контактная пружина; 7 - контактный мостик; 8 - неподвижные контакты; 9 - стержень

Устройство реле минимального тока показано на рисунке 17.4.

Катушка реле включается в цепи возбуждения тормозной машины. Когда сила тока в цепи достигает значения срабатывания реле, при котором притяжение якоря к полюсному наконечнику 2 станет больше противодействующей силы пружины 12, реле включится. При этом верхние контакты 6 замкнутся, а нижние 11 разомкнутся.

Величину тока срабатывания реле можно регулировать путем изменения силы натяжения возвратной пружины с помощью корончатой гайки 5 и изменяя воздушный промежуток в электромагните винтом 4. При ослаблении натяжения пружины или при уменьшении воздушного промежутка реле включается при меньшей силе тока в катушке.

Реле максимального тока - электромагнитное токовое реле мгновенного действия. Реле применяют для защиты электродвигателей от повреждения при резком возрастании силы тока, например, при большой перегрузке, резком включении, коротком замыкании. Устройство реле максимального тока показано на рисунке 17.5.

Катушка реле включается последовательно в фазу силовой цепи электродвигателя, а контакты 1 - в цепь управления аппаратом, который обеспечивает автоматическое выключение цепи питания двигателя. При прохождении тока в катушке возбуждается магнитное поле, которое растет с увеличением силы тока. Это поле замыкается по магнитопроводу и действует на толкатель, закрепленный во втулке 6. Под действием магнитных сил толкатель вместе с втулкой подтягивается вверх, и если сила тока больше заданной величины, на которую настроено реле, воздействует на контактный мостик, размыкая контакты. Отдельные реле в данном случае не имеют своих контактов, а устанавливаются в устройство с одним контактом для всех реле. Такое групповое реле может состоять из четырех блок-реле. Реле настраивается на силу тока срабатывания вращением винта

8 в соответствии со шкалой указателя, соединенного с этим винтом. Чем ниже опущен якорь из втулки, тем большая сила тока необходима для срабатывания реле.

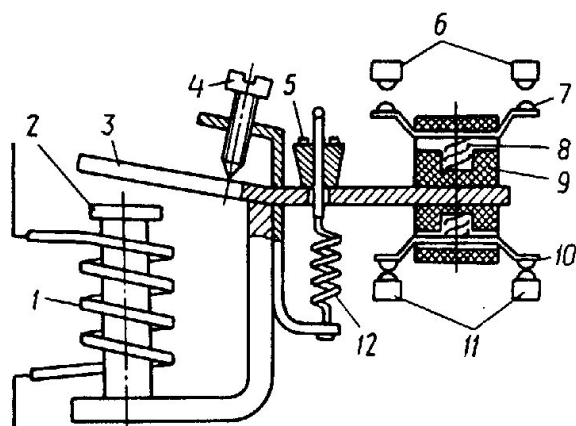


Рисунок 17.4 - Реле минимального тока
1 – катушка; 2 – ярмо; 3 – якорь; 4 – винт;
5 – гайка; 6, 7, 10, 11 – контакты;
8, 12 – пружины; 9 – колодки

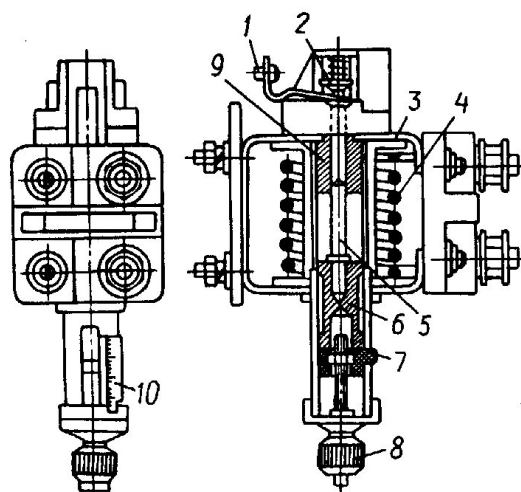


Рисунок 17.5 - Реле максимального тока
1 – неподвижный контакт; 2 – контактный мостик; 3 – магнитопровод; 4 – катушка;
5 – толкатель; 6, 7, 9 – втулки;
8 – регулировочный винт; 10 – шкала

Тепловое реле служит для защиты электродвигателя от небольших, но длительных перегрузок, при которых сила тока двигателя на 30% и более превышает номинальное значение. Тепловое реле срабатывает при определенном значении силы тока в течение некоторого интервала времени.

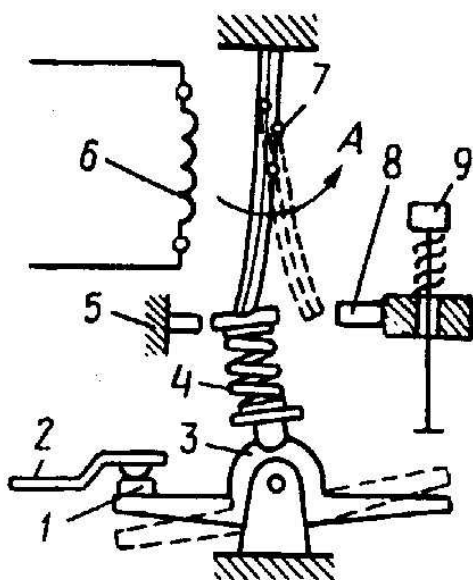


Рисунок 17.6 - Устройство теплового реле
1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт; 3 – колодка; 4 – пружина; 5, 8 – подпорки; 6 – нагревательный элемент;
7 – биметаллическая пластина;
9 – возвратное устройство

движение пластины и верхнего конца пружины ограничивается упором 5.

Основным элементом реле (рис. 17.6) является биметаллическая пластина, сваренная из двух металлов с разным коэффициентов линейного расширения. Когда пластина нагревается рабочим током, протекающим по нагревательному элементу (или непосредственно по пластине), она изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения.

В тепловом реле биметаллическая пластина упирается в верхний конец пружины. Нижний конец пружины давит на выступ пластмассовой колодки, шарнирно закрепленной на оси. В положении, показанном на рисунке 17.6,

Пружина воздействует на выступ колодки так, что она оказывается повернутой по часовой стрелке, а закрепленный на ней подвижный контакт — замкнутым с неподвижным контактом. Когда по нагревательному элементу протекает повышенный ток, биметаллическая пластина нагревается, и ее нижний конец перемещается в направлении стрелки *A*. Вследствие этого верхний конец пружины перемещается вправо, и пластмассовая колодка поворачивается против часовой стрелки (показано пунктирной линией), а контакты *1* и *2* размыкаются. Упоры *5* и *8* ограничивают положение нижнего конца пластины.

В исходное положение реле возвращается самопроизвольно, когда биметаллическая пластина остынет (реле с самовозвратом). Упор *8* может быть снят. Тогда реле возвращается в исходное положение возвратным устройством. Реле срабатывает с выдержкой времени, которая находится в обратной зависимости от силы тока. Чем больше сила тока в нагревательном элементе, тем меньше время, в течение которого биметаллическая пластина нагревается до срабатывания реле.

Тепловое реле не срабатывает в случае мгновенного роста силы тока, поэтому не может служить надежной защитой от коротких замыканий. Тепловые реле используют в схемах ПТМ для защиты короткозамкнутых АД и устанавливаются в магнитных пускателях или в автоматических выключателях с тепловыми или комбинированными расцепителями.

Резисторы. Применяемые в электрооборудовании башенных кранов резисторы делятся на пускорегулирующие, включаемые в силовую сеть электродвигателей, и резисторы, используемые в цепях управления и сигнализации.

Пускорегулирующие резисторы (реостаты) включаются в цепь ротора электродвигателя и служат для плавного разгона, торможения и регулирования частоты вращения электродвигателя, а также для торможения его в режиме противовключения.

В *проволочных резисторах* на металлические держатели, изолированные по граням фарфоровыми изоляторами, намотана константановая проволока.

Элементы *ленточных резисторов* (рис. 17.7) выполняются из намотанной на ребро ленты *3*, укрепленной на стальном держателе с помощью фарфоровых изоляторов *1*. Эти элементы собираются в ящике аналогично проволочным резисторам.

Пускорегулирующий реостат в зависимости от мощности и назначения электродвигателя состоит из одного или нескольких ящиков резисторов.

Включают реостаты в цепь ротора двигателя или выключают (закорачивают) их в процессе работы с помощью контроллеров. Резисторы рассчитаны, как правило, только на кратковременное включение при пуске или торможении двигателя. Длительная работа электродвигателей с включенными реостатами (рукоятка контроллера не установлена в крайнее по-

ложение) недопустима, так как при этом резисторы сильно перегреваются.

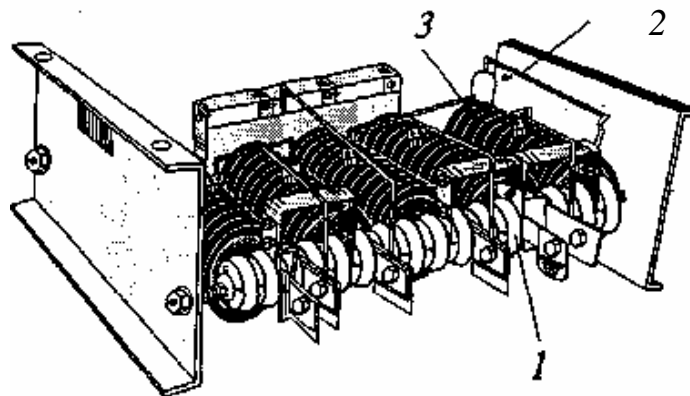


Рисунок 17.7 - Ящик с ленточными резисторами:
1 – изоляторы; 2 – переключатель; 3 – фехрелевая лента

Тормозные устройства. *Тормозные машины* применяют в электроприводе грузоподъемных лебедок для получения пониженных скоростей перемещения груза.

На башенных кранах устанавливают тормозную машину переменного тока ТМ-4А, представляющую собой короткозамкнутый асинхронный электродвигатель специального исполнения, имеющий малую частоту вращения.

Тормозная машина рассчитана на кратковременную работу с ПВ = 15% и должна использоваться только для небольших перемещений грузов.

Тормозные электромагниты и электрогидравлические толкатели применяют для растормаживания колодочных тормозов в механизмах крана.

Тормозные электромагниты имеют две основные части: магнитопровод и обмотку возбуждения (катушку). Магнитопровод состоит из неподвижного ярма и подвижного якоря. При прохождении тока через укрепленную на ярме катушку возникает магнитное поле, под действием которого якорь притягивается к ярму и через систему рычагов растормаживает тормоз.

Тормозные электромагниты разделяют по роду питания на электромагниты переменного и постоянного тока.

Электрогидравлические толкатели - это машины, преобразующие электрическую энергию в механическую и имеющие линейно перемещающийся исполнительный орган (шток). По сравнению с тормозными электромагнитами электрогидравлические толкатели обладают рядом преимуществ:

размеры и масса их меньше по сравнению с аналогичными по рабочим параметрам электромагнитами, потребление электроэнергии также в несколько раз меньше;

величина напорного усилия гидротолкателя не зависит от положения поршня, в то время как у электромагнита усилие резко изменяется в зависимости от величины воздушного зазора между ярмом и якорем;

с повышением внешней нагрузки до величины максимального упорного усилия толкателя поршень останавливается. При этом не происходит ни перегрузки двигателя, ни механических повреждений элементов толкателя.

Полупроводниковые выпрямители служат для выпрямления переменного тока. Постоянный ток применяют на башенных кранах для питания обмоток возбуждения тормозных машин и тормозных электромагнитов, цепей управления катушек контакторов и цепей управления магнитных усилителей, для динамического торможения асинхронных двигателей, а также для питания цепей ограничителей грузоподъемности и анемометров.

Конечные выключатели служат для ограничения действия механизмов крана, включения цепей сигнализации, а также используются в качестве выключателей блокировки. По принципу работы конечные выключатели подразделяют:

на рычажные (рис. 17.8), срабатывающие при действии на них отключающих устройств;

приводные (шпиндельные), которые жестко связаны с валом механизма и срабатывают после поворота вала выключателя на определенный угол.

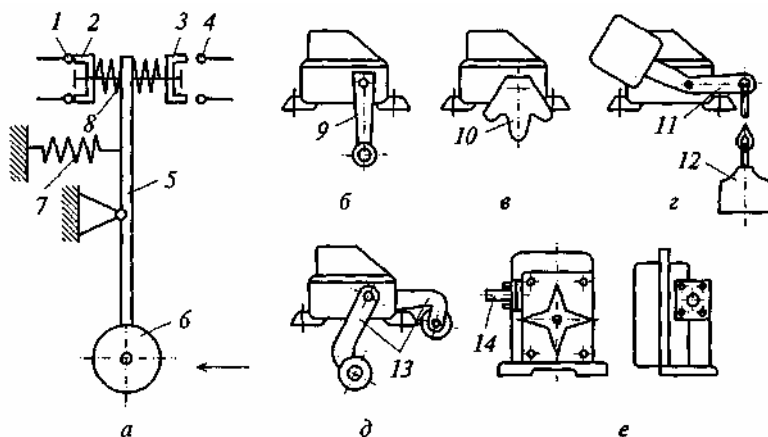


Рисунок 17.8 - Конечные выключатели:

а - рычажный; *б* - КУ-701; *в* - КУ-704; *г* - КУ-703; *д* - КУ-706; *е* - ВУ-250;
 1, 4 - неподвижные контакты; 2, 3 - контактные мостики; 5, 9, 13 - рычаги; 6 - ролик;
 7 - возвратная пружина; 8 - пружина контактных мостиков; 10 - сектор;
 11 - рычаг с противовесом; 12 - груз; 14 - входной вал

Плавкие предохранители предназначены для защиты электрооборудования и электрических сетей от больших токов, возникающих при коротких замыканиях, и значительных (50% и более) перегрузках.

В предохранителе помещается проводник с низкой температурой плавления (плавкая вставка), через который проходит ток защищаемой цепи. При увеличении силы тока выделяется большое количество тепла, под

действием которого проводник расплавляется и размыкает цепь. На башенных кранах применяют трубчатые предохранители без наполнения ПР-2 и с наполнением ПН-2, НПР, НПН.

Рубильники и силовые распределительные ящики (рис. 17.9,) служат для нечастой коммутации (замыкания и размыкания) электрических цепей переменного и постоянного тока напряжением до 500 В. На башенных кранах рубильники применяют в защитных панелях и в силовых распределительных ящиках. Силовые распределительные ящики используют на башенных кранах в качестве вводных (портальных) рубильников, устанавливаемых в нижней части металлоконструкции крана, на портале или на ходовой раме.

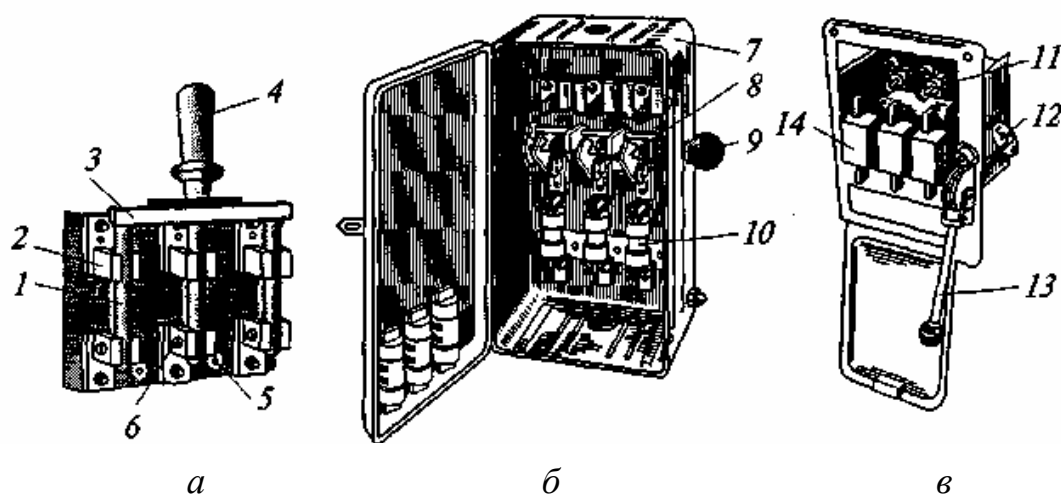


Рисунок 17.9 - Аппараты для нечастой коммутации электрических цепей:
а - рубильник; *б* - силовой распределительный ящик; *в* - блок предохранитель-
 выключатель; 1 - нож; 2, 11 - контактные губки; 3 - траверса; 4, 9, 13 - рукоятки;
 5 - изоляционная плита; 6 - контактная стойка; 7 - шкаф; 8 - встроенный рубильник;
 10 - предохранители; 12 - рычажная система; 14 - подвижный нож-предохранитель

Рубильник (рис. 17.9, *а*) имеет один или несколько подвижных ножей 1, шарнирно укрепленных в контактных стойках 6. Ножи связаны траверсой 3 из изолирующего материала. При включении рубильника ножи вводятся в контактные губки 2. К губкам присоединяют провода от источника питания, а к контактным стойкам ножей - провода включаемой рубильником цепи. Рубильником управляют (включают и отключают) с помощью рукоятки 4.

По числу размыкаемых цепей различают одно-, двух- и трехполюсные рубильники.

Силовой распределительный ящик (рис. 17.9, *б*) представляет собой шкаф 7 со встроенными в него рубильником 8 и предохранителями 10. Рубильник управляется с помощью рычажного привода боковой рукояткой 9. Рукоятка имеет блокировочное устройство, благодаря которому нельзя открыть крышку шкафа при включенном рубильнике и включить рубильник при открытой крышке. В корпусе предусмотрен зажим для крепления заземляющего провода. В некоторых конструкциях силовых распределительных ящиков предусмотрена возможность установки дополнительных предохранителей.

тельных ящиков вместо отдельно устанавливаемых рубильника и плавких предохранителей применяют встраиваемый блок предохранитель-выключатель (рис. 17.9, в). Блок состоит из контактных губок 11, установленных на изоляционной панели, и подвижных ножей 14, выполненных вместе с предохранителями. Блок включается и отключается рукояткой 13, связанной с ножами при помощи рычажной системы 12.

На всех распределительных ящиках, которые установлены в качестве портального рубильника на кране или в качестве рубильника на подключаемом пункте у подкранового пути, предусматривается устройство для запираания ящика с рукояткой, установленной в положение «Выключено». Оно должно быть выполнено так, чтобы в запертом положении нельзя было включить рукоятку, а при включенной рукоятке - запереть устройство.

Автоматические выключатели (автоматы) предназначены для автоматического отключения электрических цепей в случае нарушения нормальных условий их работы (например, при перегрузке или коротком замыкании), а также для нечастой коммутации.

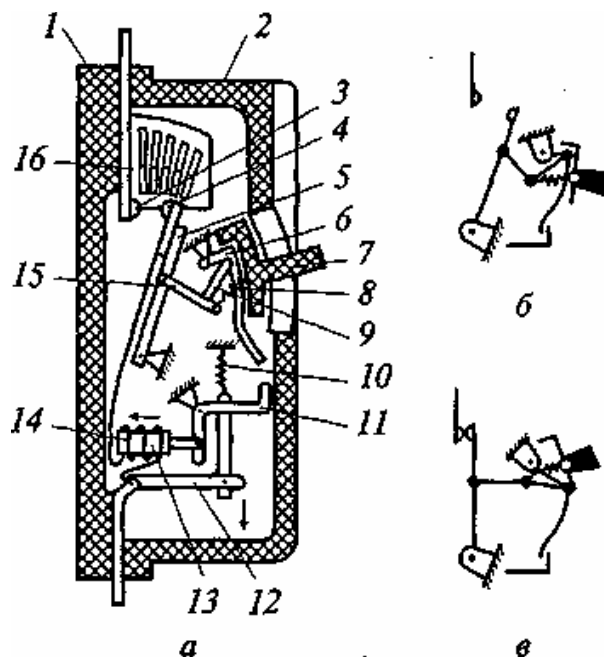


Рисунок 17.10 - Автоматический выключатель А-3100: а - конструктивная схема; б - рычажная система автомата перед включением; в - рычажная система автомата после включения

Автомат (рис. 17.10, а) состоит из корпуса (основание 1 и крышка 2), коммутирующего устройства (неподвижные контакты 3 и подвижные контакты 4), дугогасительных камер 16, механизма управления и расцепителей максимального тока.

В состав механизма управления входят: рукоятка 7, фигурная деталь 6, пружины 8 и 10, рычаги 9 и 15.

Автоматический выключатель отключается (размыкает свои силовые контакты) при срабатывании расцепителей максимального тока

По принципу действия расцепители бывают: тепловыми,

электромагнитными и комбинированными, состоящими из последовательно включенного теплового и электромагнитного расцепителей. Основным элементом теплового расцепителя является биметаллическая пластина.

Электромагнитный расцепитель состоит из катушки 14 и сердечника 13. При возникновении тока короткого замыкания сердечник мгновенно втягивается в катушку. При этом рычаг 11 поворачивается, освобождает от зацепления с зубом фигурную деталь 6, и автомат отключается без выдержки времени.

Аппаратура ручного управления. Для нечастых переключений цепей управления и освещения в схемах башенных кранов применяют кнопки управления, выключатели управления, пакетные выключатели и универсальные переключатели.

Кнопки управления (рис. 17.11, а) служат для замыкания и размыкания цепей катушек контакторов, магнитных пускателей и реле, а также для включения звукового сигнала. Комплект кнопок, встроенных в общий кожух, называется кнопочной станцией.

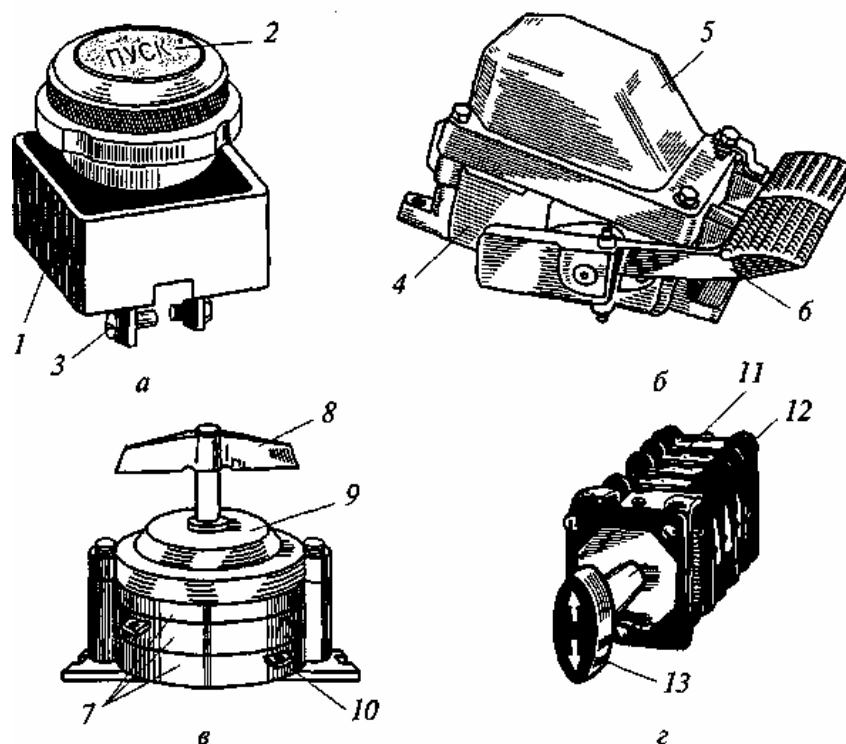


Рисунок 17.11 - Аппараты ручного управления для коммутации цепей управления и освещения кранов: а - кнопка управления; б - педальный выключатель; в - пакетный выключатель; г - универсальный переключатель

Выключатели управления бывают с ручным приводом и педальным (ножным). Выключатели с ручным приводом используются для отключения линейного контактора, их обычно называют аварийными выключателями. Педальные выключатели (рис. 17.11, б) применяют для включения цепей управления, например для управления посадочной скоростью грузовых лебедок в схеме противовключения. Контакты выключателей управления рассчитаны на силу тока до 10 А.

Пакетные выключатели (рис. 17.11, в) применяют в схеме кранов для включения цепей управления и освещения. С помощью пакетных выключателей включают рабочее освещение и нагревательные приборы. Пакетный выключатель состоит из двух узлов: контактной системы и переключающего механизма.

Пакетные выключатели выпускают в открытом и защищенном исполнении на величину силы тока от 10 до 60 А.

Универсальные переключатели (рис. 17.11, з) - это многоцепные электрические аппараты, применяемые для нечастых переключений электрических цепей. На башенных кранах, у которых предусмотрено управление механизмами из кабины или с переносного монтажного пульта, универсальные переключатели используют для переключения схемы крана на пульт или кабину. На некоторых кранах переключатели применены в качестве командоаппаратов для управления магнитными контроллерами.

Токоприемники. С помощью токоприемника электрооборудование вращающейся части крана связано с внешней сетью и электроаппаратами, установленными на неповоротной части крана.

По принципу работы токоприемники башенных кранов разделяют на кольцевые и бескольцевые.

Бескольцевой токоприемник представляет собой шлейф из гибких проводов, связывающих зажимы цепи на вращающейся и неповоротной частях крана. Длина проводов выбирается достаточной для двух полных оборотов крана (720°) в обе стороны от начального положения.

Бескольцевой токоприемник применяют на большинстве башенных кранов, так как он значительно проще и надежнее кольцевого. При эксплуатации крана с бескольцевым токоприемником следует систематически наблюдать за работой ограничителя поворота, так как его неисправность может привести к скручиванию и обрыву проводов гибкого шлейфа.

Провода и кабели. Для подключения электрооборудования к внешней цепи, а также для электрической связи между электродвигателями и электроаппаратами на башенном кране применяют провода и кабели.

Провода и жилы кабелей всех цепей крановой электросхемы должны иметь хорошо видную буквенную и цифровую маркировку.

Согласно правилам устройства электроустановок электропроводка на кранах может выполняться проводами и кабелями с медными жилами. Сечение проводов и токоведущих жил кабелей выбирают по допустимым длительным токовым нагрузкам в зависимости от мощности, потребляемой приемником. Однако по условиям механической прочности сечение медных проводов должно быть не менее $2,5 \text{ мм}^2$. В цепях управления для присоединения командоаппаратов, а также в цепях телеуправления и связи допускается использовать гибкие провода с медными жилами сечением меньше $2,5 \text{ мм}^2$, при условии, что эти провода не несут механической нагрузки.

Внешнюю электропроводку по крану выполняют гибким кабелем с медными жилами в резиновой или равноценной изоляции, предназначенной для работы в интервале температур от -40 до $+40^\circ\text{C}$. Для электропроводки в шкафах магнитных контроллеров и в кабинах используют одножильные и многожильные провода (ПР, ПРГ, ПВ-ХЛ, ПГВ-ХЛ) либо кабели для внешней проводки.

Кабельные барабаны. Электрическая энергия подается от внешней цепи к электрооборудованию крана по кабелю. Длина кабеля, который соединяет вводный рубильник на ходовой раме (портале) башенного крана с подключательным пунктом у кранового пути, обычно равна 50 м.

Для предохранения кабеля от износа и обрывов при задевании за неровности подкранового пути применяют различные средства. При длине пути более 50 м подключательный пункт размещают у середины подкранового пути, а для кабеля устраивают деревянный лоток, по которому кабель протаскивают краном. При длине пути 50 м и менее вдоль подкранового пути натягивают на стойках проволоку или канат, а к ним с помощью проволочных колец прикрепляют кабель.

Применение кабельного барабана избавляет от необходимости выполнять эти сложные и ненадежные устройства. Кабельный барабан предназначен для наматывания (или сматывания) кабеля при перемещении крана по рельсовому пути. Барабан представляет собой полый цилиндр, внутри которого помещается кольцевой токоприемник, связывающий наматывающийся кабель с вводным рубильником.

Кабель наматывается на внешнюю цилиндрическую поверхность барабана. Кабельный барабан укрепляется на металлоконструкции крана и имеет приводное устройство, с помощью которого происходит наматывание кабеля на барабан при движении крана к подключательному пункту. Кабель сматывается с барабана за счет собственного натяжения или в результате изменения направления вращения привода барабана.

17.4 Электрический привод строительных кранов

Электрический привод исполнительных механизмов ПТМ используется на гусеничных и пневмоколесных самоходных кранах, а также на автомобильных и башенных кранах.

На строительных кранах наибольшее распространение получил многодвигательный электрический привод переменного и постоянного тока. Причем электрический ток часто вырабатывается собственной силовой установкой и поступает от синхронного генератора к электродвигателям исполнительных механизмов. Электрические схемы привода строительных кранов предусматривают возможности питания электродвигателей не только от генератора, но и от внешней сети трехфазного тока напряжением 380 В. Питание от внешней сети осуществляется по кабелю, который дает возможность передавать электроэнергию через кольцевой токоприемник на панель управления в кранах с приводом переменного тока. В кранах с приводом постоянного тока от внешней сети ток подводится к электродвигателю переменного тока, который вращает синхронный генератор постоянного тока.

В качестве примера рассмотрим электрическую схему крана КБ-401А [45]. На рисунке 17.12 показана электрическая схема силовых цепей крана, на рисунке 17.13 – схема цепей управления, а на рисунке 17.14 – схема цепей освещения, отопления и сигнализации.

Электропривод башенного крана КБ-401А (рис. 17.12) рассчитан на питание от внешней трехфазной электрической сети переменного тока с линейным напряжением 380 В и нейтральным проводом. Электрическая схема цепей управления (рис. 17.13) работает на переменном токе напряжением 220 В и постоянном токе от выпрямителя V2. Вспомогательные устройства (освещение, отопление, сигнализации) питаются переменным током напряжением 220 В (рис. 17.14). Электрическая цепь ремонтного освещения работает на переменном токе напряжением 12 В от понижающего трансформатора T2 (см. рис. 17.14).

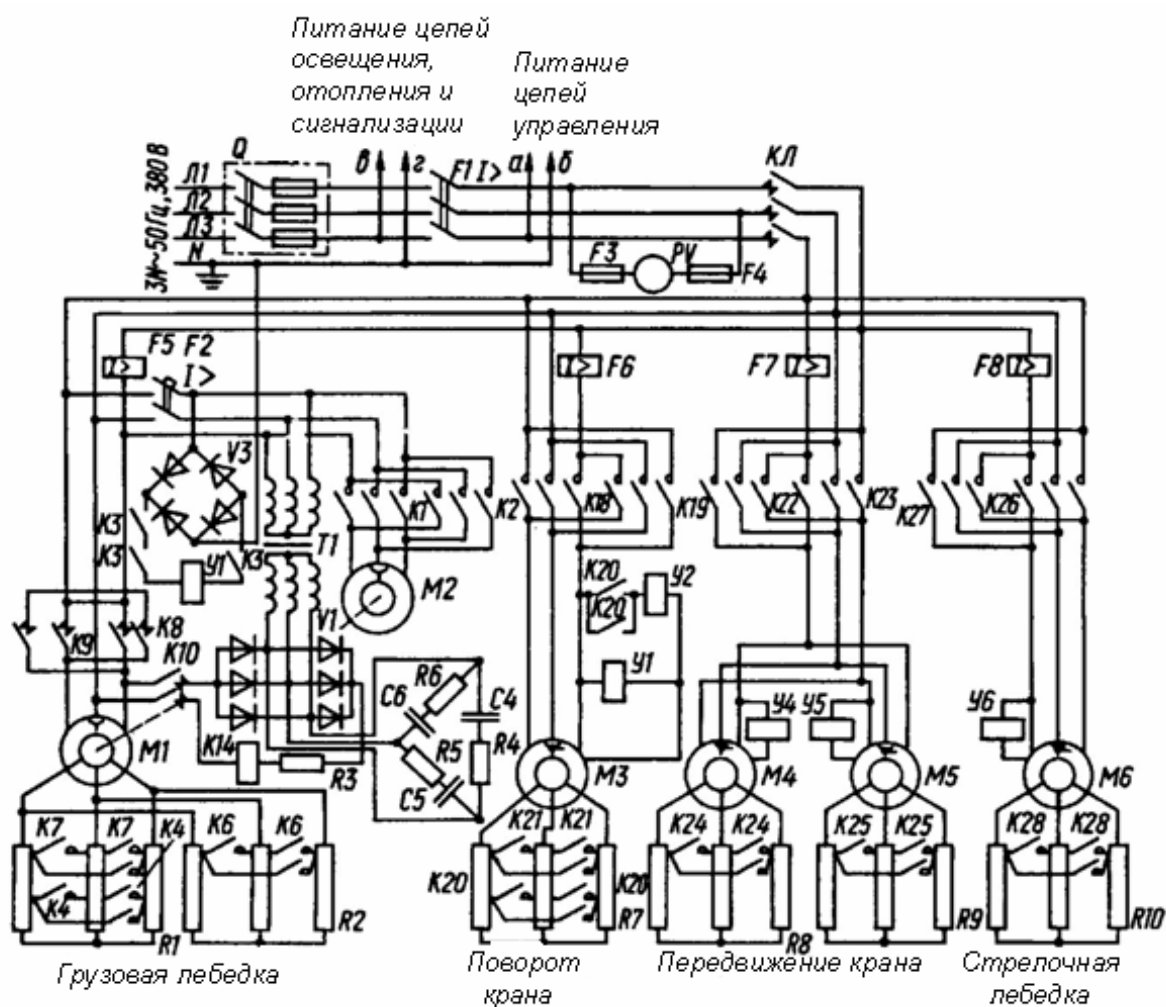


Рисунок 17.12 - Схема силовых цепей крана КБ-401А

Питание электродвигателей (рис. 17.12) осуществляется через вводный рубильник Q , автоматический выключатель $F1$, контакты линейного контактора $KЛ$ и контакты контакторов реверса.

Частоту вращения всех двигателей во время пуска регулируют изменением сопротивления пускорегулирующих реостатов. Частоту вращения электропривода поворотного механизма дополнительно регулируют посредством вспомогательного тормоза с электромагнитом $V2$, который подтормаживает механизм в первом положении ручки командоконтроллера. Для получения малых частот вращения механизма подъема груза используют электропривод с тормозной машиной переменного тока и динамическим торможением приводного электродвигателя.

В электроприводе механизма подъема груза крана КБ-401А предусмотрена защита кремниевых выпрямителей с электромагнитом $V7$ постоянного тока.

Защита выпрямителей от перенапряжения обеспечивается тремя цепочками, каждая из которых содержит последовательно включенные резисторы ($R4, R5, R6$) и конденсаторы ($C4, C5, C6$), соединенные треугольником и включенные в три фазы выпрямительного мостика VI .

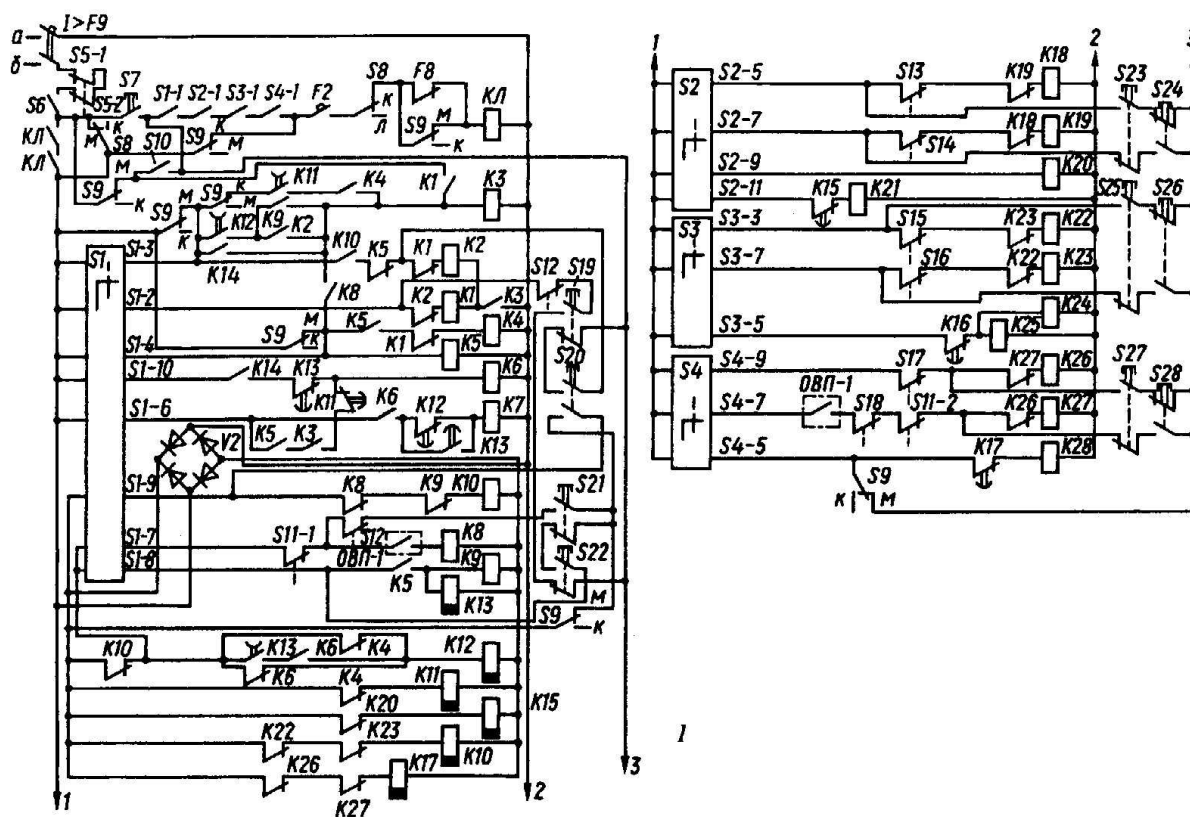


Рисунок 17.13 - Схема цепей управления краном КБ-401А

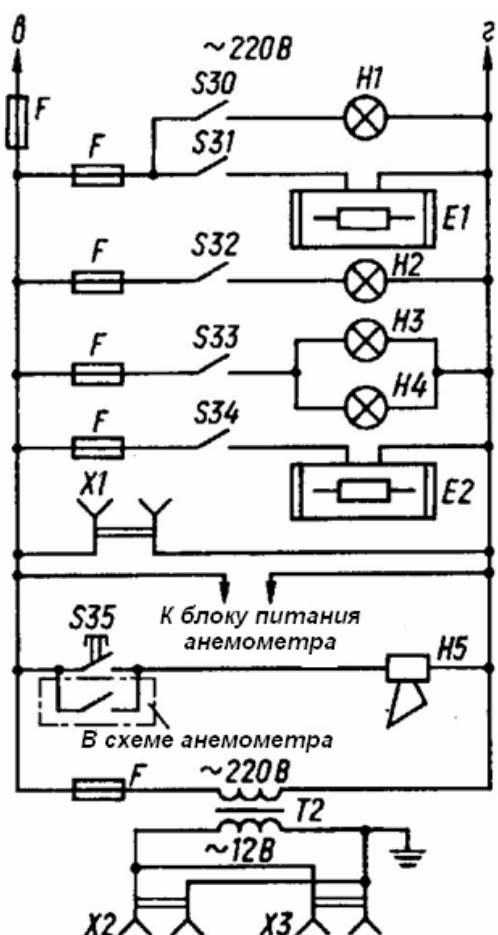


Рисунок 17.14 - Схема цепей освещения, отопления и сигнализации крана КБ-401А

Главный электромагнит постоянного тока питается от силовых цепей по специальной схеме через выпрямитель $V3$ и контакты контактора $K3$.

В электроприводах всех механизмов применены магнитные контроллеры, управлять которыми можно либо из кабины крана, либо с выносного пульта.

Во время выполнения работ управление осуществляется из кабины посредством командоконтроллеров $S1$, $S2$, $S3$, $S4$. Последовательность замыкания их контактов приведена в таблицах 17.1 – 17.3, где замкнутый контакт обозначен знаком "X".

Таблица 17.1 - Замыкание контактов командоконтроллера грузовой лебедки крана КБ-401А

Контакт	Положение ручки						
	Подъем			0	Опускание		
	3	2	1		1	2	3
S1-1				X			
S1-2			X				
S1-3					X	X	X
S1-4	X	X	X				X
S1-6	X						X
S1-7	X	X	X				
S1-8							X
S1-9					X	X	
S1-10	X				X		

Таблица 17.2 - Замыкание контактов командоконтроллера поворотного механизма крана КБ-401А

Контакт	Положение ручки						
	Подъем			0	Опускание		
	3	2	1		1	2	3
S2-2				X			
S2-5	X	X	X				
S2-7					X	X	X
S2-9	X	X				X	X
S2-11	X						X

Таблица 17.3 - Замыкание контактов командоконтроллера передвижения крана и подъема стрелы крана КБ-401А

Контакты командоконтроллера		Положение ручки				
		Вперед Подъем		0	Назад Опускание	
		2	1		1	2
S3	S4					
S3-1	S4-1			X		
S3-5	S4-5	X				X
S3-7	S4-7				X	X
S3-9	S4-9	X	X			

В случае монтажа самого крана и его испытания, когда машинист не может находиться в кабине, механизмами управляют с выносного пульта кнопками S19–S28. Перевод управления на кабину или выносной пульт выполняется универсальным переключателем S9, ручку которого устанавливают в положение *K* (управление краном из кабины) или в положение *M* (управление с выносного пульта).

В схемах электроприводов крановых механизмов обеспечивается ступенчатый разгон двигателя под контролем реле времени. При этом ступени пускорегулирующих реостатов закорачиваются в соответствии с выдержкой реле времени. Например, если установить ручку стрелового командоконтроллера S4 сразу во второе положение подъема (опускания), то сначала включится контактор реверса K26 (K27), и двигатель начнет работать с полным сопротивлением реостата. Одновременно выключится реле времени K17. Когда закончится выдержка времени, реле K17 срабатывает и своими контактами замыкает цепь катушки K28. Контактор K28 включится и закоротит реостат, оставив в цепи ротора двигателя M6 небольшое сопротивление.

Электродвигатели, электроаппараты и крановые механизмы защищаются автоматами, реле максимального тока, плавкими предохранителями и конечными выключателями (см. рис. 17.12).

Нулевую защиту выполняют контакты командоконтроллеров *S1-1*, *S2-1*, *S3-1*, *S4-1*, замкнутые только в нулевом положении ручек. Эти контакты включены последовательно с кнопкой *S7* в цепь катушки линейного контактора *КЛ*.

Электродвигатели крановых механизмов защищены от перенапряжения посредством реле максимального тока. Катушки реле *F5*, *F6*, *F7* и *F8* включены в одну фазу питания электропривода каждого механизма. Реле объединены в один блок и действуют на общий контакт *F8* в цепи катушки линейного контактора *КЛ*. Срабатывание любого реле обуславливает размыкание цепи катушки и отключение силовой цепи крана от питающей сети.

Одна фаза тормозной машины *M2* и цепи питания выпрямителя *VI* также защищены реле *F5*, а две другие фазы - трехполюсным автоматом *F2*. Третий полюс автомата включен в цепь катушки линейного контактора *КЛ*. Поэтому, в случае срабатывания автомата линейный контактор выключается.

Защиту общего питания цепи от короткого замыкания осуществляют автоматический выключатель и плавкие предохранители силового вводного ящика *Q*. Конечную защиту от перехода крановыми механизмами крайних положений выполняют концевые выключатели, размыкающиеся контакты которых включены в цепи катушек соответствующих контакторов.

Концевой выключатель *S11* размыкается, когда крюковая подвеска подходит к стреле. Концевой выключатель *S13* размыкается в крайнем правом положении поворотной платформы, а *S14* - в ее крайнем левом положении. Контакт *S15* концевого выключателя ограничителя передвижения крана размыкается в крайнем положении во время движения крана вперед, а контакт *S16* того же выключателя - в крайнем положении во время движения назад. Концевые выключатели *S17* и *S18* выключают электродвигатель стреловой лебедки соответственно в крайнем верхнем и крайнем нижнем положениях стрелы. Работу грузовой лебедки контролирует ограничитель грузоподъемности ОВП-1, выходной контакт которого включен в цепь катушки *K8*. В случае размыкания контакта (в результате превышения грузоподъемности) выключается контактор поднятия груза и схема дает возможность выполнять операцию опускания груза.

Если нужно срочно остановить все крановые механизмы, линейный контактор можно выключить аварийным выключателем *S6* в кабине управления или *S10* на выносном пульте.

В цепях освещения, отопления и сигнализации (см. рис. 17.13) лампа *H1* освещения кабины управления и лампы *H2*, *H3*, *H4* прожекторов освещения рабочей зоны управляются пакетными выключателями *S30-S34*. Кабина управления отапливается нагревательными приборами *E2*. Трубчатые нагреватели *E1* служат для обогрева фонаря кабины.

Звуковая сирена *H5* включается кнопкой *S35* и размыкающимся контактом выходного реле анемометра. При нормальной ветровой нагрузке и исправной схеме анемометра его выходное реле включено, и контакт в цепи сирены разомкнут. В случае выключения выходного реле анемометра (в результате усиления ветра или неисправности в схеме анемометра) контакт замыкается и включает сирену.

К цепям освещения подсоединен блок питания анемометра и трансформатор Т2 с розетками *X1* и *X2* для включения ламп ремонтного освещения. Цепи освещения, отопления и сигнализации защищены плавкими предохранителями.

Выводы

1. Электрооборудование подъемно-транспортных машин по своему назначению подразделяется на основное (оборудование электропривода) и вспомогательное (оборудование рабочего и ремонтного освещения и др.).

2. Для электропривода подъемно-транспортных машин используются электродвигатели специального кранового типа.

3. Включение и выключение электродвигателей подъемно-транспортных машин осуществляется специальными аппаратами - пускателями и контакторами.

4. Для защиты электрооборудования от аварийных режимов применяют предохранители с плавкими вставками, тепловые реле и реле максимального тока.

Вопросы для самопроверки

1. Какое оборудование относится к подъемно-транспортным машинам и какими особенностями характеризуется его работа? Дайте его характеристику.

3. Приведите примеры вспомогательного электрооборудования подъемно-транспортных машин.

4. Дайте характеристику крановых асинхронных электродвигателей.

5. Как осуществляется пуск асинхронных электродвигателей электроприводов подъемно-транспортных машин?

6. Дайте характеристику крановых электродвигателей постоянного тока.

7. Охарактеризуйте назначение и особенности основных элементов аппаратуры управления электроприводами подъемно-транспортных машин.

8. Объясните принцип работы реле постоянного тока.

9. Объясните принцип работы реле минимального тока.

10. Объясните принцип работы реле максимального тока.

11. Объясните принцип работы теплового реле.

12. Объясните назначение основных элементов силовых цепей крана КБ-401А.

13. Объясните назначение основных элементов цепей управления краном КБ-4001А.

18 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РУЧНЫЕ МАШИНЫ

Ключевые понятия: электрическая ручная машина, класс изоляции, комбинированный электромеханизм, вибратор.

18.1 Общие сведения

В строительном производстве применяются разнообразные механизмы и ручные машины, оснащенные электроприводом. Одной и той же машиной при применении различных стандартных или специальных рабочих инструментов либо специализированных насадок можно выполнять различные технологические операции и обрабатывать различные материалы, поэтому электрические ручные машины можно разделить по основному, соответствующему названию машины назначению, на следующие группы: сверлильные машины; шлифовальные машины; машины для распиловки древесины; гайковерты и шуруповерты; машины ударного действия; вибраторы.

Электрические ручные машины (ЭРМ) приводятся в движение электродвигателем или электромагнитом, составляющими с машиной единое целое. В качестве двигателей применяются:

- асинхронные трехфазные электрические машины с короткозамкнутым ротором, нормальной и повышенной частотой тока;

- асинхронные однофазные электрические машины с короткозамкнутым ротором, нормальной и повышенной частотой тока;

- обращенные (т. е. вращается статор, а ротор закреплен неподвижно) асинхронные трехфазные электрические машины с короткозамкнутым ротором, нормальной и повышенной частотой тока;

- универсальные коллекторные электрические машины;

- электрические машины возвратно-поступательного движения (электромагнитные).

В ЭРМ, как правило, применяются специально изготовленные для них электродвигатели, работающие на напряжении 36 или 220 В. В передвижных машинах используют также двигатели общего назначения на напряжение 380/220 В.

Специализированными заводами по выпуску ручных машин применяются следующие условные обозначения электродвигателей:

- КН - коллекторный нормальной частоты тока;

- КНД - коллекторный нормальной частоты тока с двойной изоляцией;

- АН - асинхронный нормальной частоты тока;

- АП - асинхронный повышенной частоты тока.

Следующие за буквами цифры обозначают габарит двигателей (диаметр и длина активной стали статора или индуктора).

В силу ручного использования этой группы электрических механизмов особое внимание при их разработке уделяется вопросам электрической изоляции.

18.2 Изоляция электрических ручных машин

ЭРМ выпускают трех классов исполнения по напряжению и изоляции:

I класс - на номинальное напряжение 220 В, у которых хотя бы одна металлическая деталь, доступная для прикосновения, отделена от частей, находящихся под напряжением только рабочей изоляцией;

II класс - на номинальное напряжение 220 В, у которых все металлические детали, доступные для прикосновения, отделены от частей, находящихся под напряжением, двойной или усиленной изоляцией;

III класс - на номинальное напряжение 36 В.

ЭРМ первого класса опасны в отношении поражения рабочего электрическим током. При работе их необходимо надежно заземлять, использовать резиновые коврики и диэлектрические перчатки, но даже при этом в строительных условиях их не везде разрешается эксплуатировать. Полная электробезопасность работы с машинами I-го класса может быть обеспечена только при подключении их к сети через защитно-отключающее устройство, которое гарантирует отключение машины от сети в случае утечки тока и короткого замыкания обмоток двигателя. Время срабатывания защиты не более 0,05 с.

ЭРМ второго класса (с двойной изоляцией) - наиболее прогрессивны, так как они могут питаться от осветительной сети, их не нужно заземлять, и при этом обеспечивается полная электробезопасность работы при соблюдении правил эксплуатации. Двойная изоляция машин осуществляется двумя основными способами:

статор (индуктор с катушками) двигателя, щеточный механизм, выключатель и все токопроводящие (соединительные) провода размещены в корпусе и рукоятке из изоляционного материала (высокопрочная пластмасса), а вал ротора (якоря) имеет электроизоляционную втулку, изолирующую его от ротора (якоря) и коллектора (рис. 18.1);

статор (индуктор с катушками) двигателя, щеточный механизм и все токопроводящие (соединительные) провода размещены в пластмассовом или алюминиевом корпусе, который монтируют в корпусе из пластмассы. К корпусу крепится рукоятка, в которой установлен выключатель и закреплен токопроводящий кабель (как вариант, пластмассовая втулка может быть помещена между статором и наружным металлическим корпусом). Вал двигателя не имеет промежуточной изоляционной втулки. Вместо втулки второй изоляцией служит ведомая шестерня из электроизоляционного материала (пластмасса, текстолит). Шестерня может иметь только ступицу из электроизоляционного материала, а венец - стальной.

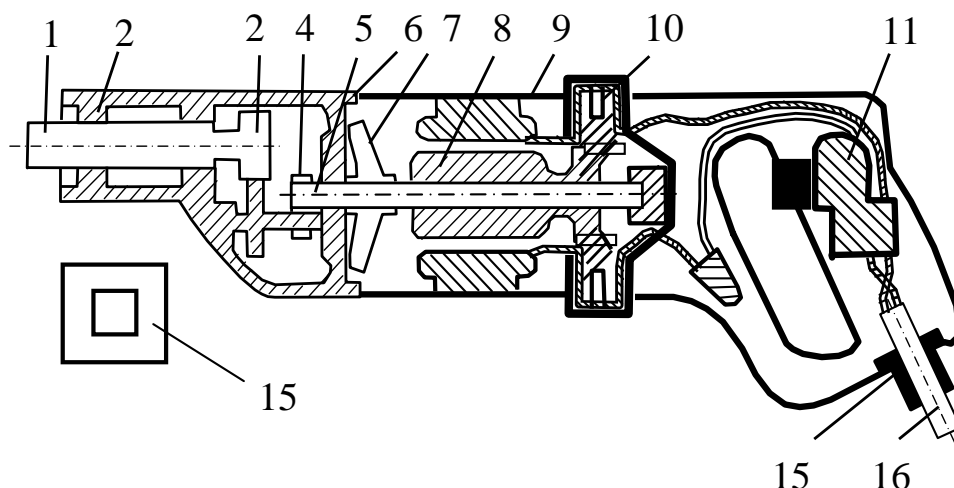


Рисунок 18.1 - Ручная электрическая сверлильная машина:

1 - шпиндель; 2 - металлический корпус редуктора; 3 - редуктор; 4 – изоляционная шестерня; 5 - вал; 6 - промежуточный пластмассовый щит; 7 - пластмассовый вентилятор; 8 - якорь; 9 - пластмассовый наружный корпус; 10 - колпачок щеткодержателя; 11 - выключатель; 12 - токопроводящий кабель; 13 - защитная гибкая трубка; 14 - условное обозначение на корпусе машин с двойной изоляцией

Машины II класса (с двойной изоляцией) на корпусе или на заводском щитке имеют специальный знак (см. рис. 18.1).

Машины III класса в работе безопасны и должны получать питание от автономных источников тока или от сети через трансформаторы или преобразователи частоты тока, если в машине встроен двигатель повышенной частоты тока.

18.3 Примеры конструкций электрических ручных машин

Существуют различные конструкции сверлилок, электропил, электрорубанков, электрошлифовальных машин, электромагнитных перфораторов и иных электрифицированных ручных инструментов. Их силовое электрооборудование всегда строится на основе только электродвигателей вращательного движения, либо на базе только возвратно-поступательных двигательных устройств, либо представляет собой комбинированный электромеханизм с вращающимся ударным элементом возвратно-поступательного действия.

18.3.1 Комбинированный электромеханизм. Примером ручного электроинструмента, который применяется в качестве электробура и электромолотка, служит электромагнитный перфоратор, например типа ИЭ-4709 Б (рис. 18.2). Этот перфоратор подключается гибким переносным проводом к сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Потребляемая сила тока в номинальном режиме составляет 3,2 А, потребляемая мощность - 650 Вт.

18.3.2 Вибраторы. Вибраторами называют простейшие вибрационные машины, предназначенные для возбуждения механических колебаний. Они представляют собой машины, преобразующие механическую, электрическую или химическую энергию в механические колебания и передающие их материалам или устройствам. Колебания характеризуют амплитудой A , т.е. наибольшим отклонением от среднего положения, измеряемым в миллиметрах, и частотой n , т.е. числом периодов колебаний в единицу времени, измеряемым числом колебаний в 1 с.

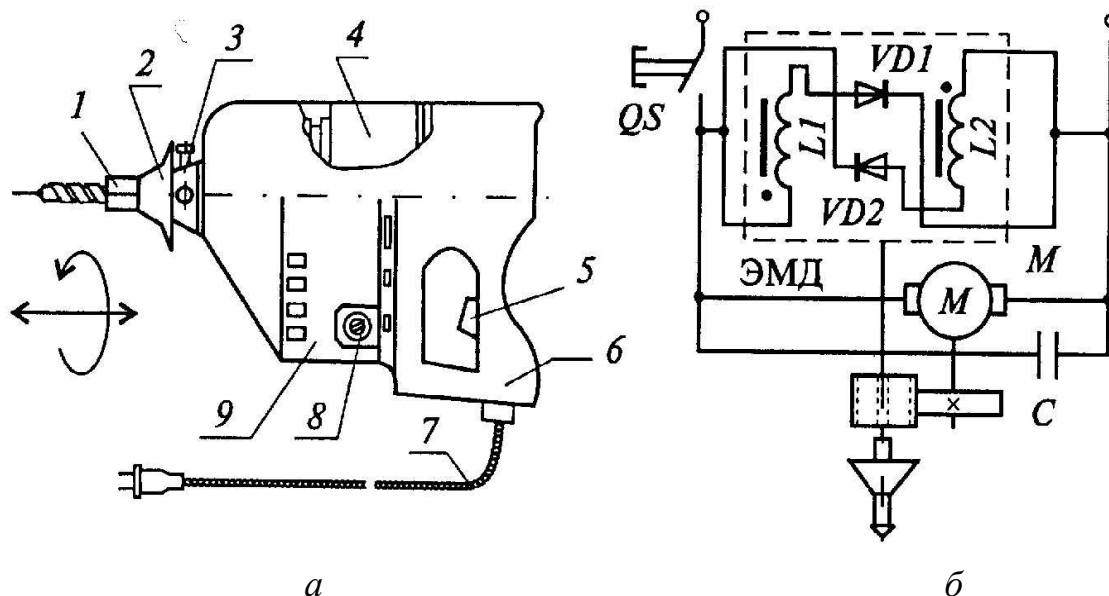


Рисунок 18.2 - Электромагнитный перфоратор:
 а – устройство; б – принципиальная схема: 1 - рабочий орган;
 2 - резиновый фартук; 3 - букса; 4 - двигатель; 5 - выключатель с
 самовозвратом; 6 - ручка; 7 - провод; 8 - отверстие; 9 - корпус

Эффективное уплотнение бетонной смеси вибрированием достигается лишь при определенных значениях амплитуды и частоты, при которых возникают ускорения, снижающие силы внутреннего трения между частицами смеси настолько, что они начинают перемещаться относительно друг друга под действием силы тяжести. Обычно применяют вибраторы с частотой колебаний $n = 25\text{--}250\text{ с}^{-1}$ и амплитудой колебаний 0,1–3 мм (большие значения амплитуды для меньших значений частоты).

По роду привода вибраторы подразделяют на электромеханические, электромагнитные, пневматические, гидравлические и моторные, приводимые в действие двигателями внутреннего сгорания. Наибольшее распространение получили электромеханические инерционные вибраторы с вращающимися неуравновешенными грузами, закрепленными на валу ротора электродвигателя или на отдельном валу, получающем вращение от электродвигателя через муфту или клиноременную передачу.

Поверхностные и наружные вибраторы. Наиболее широко применяют электромеханические вибраторы центробежного типа, у которых инерционный элемент в виде дебаланса или бегунка совершает вращатель-

ное движение и передает возникающую при этом центробежную вынуждающую силу на подшипники вала дебаланса или опору бегунка.

Электромеханический дебалансный вибратор ИВ-70 (рис. 18.3) состоит из корпуса, электродвигателя и дебалансного вибровозбудителя. В алюминиевом корпусе 1 с подшипниковыми щитами 4 расположен трехфазный асинхронный электродвигатель, к обмоткам статора 3 которого ток поступает через клеммную коробку 2, а ротор 5 укреплен на валу 6. Вал опирается на подшипники 7, а на консольных частях вала укреплены дебалансы 8, закрытые крышками 9. Крышки стянуты шпильками 10 и плотно примыкают к корпусу, в нижней части которого находятся установочные лапы с отверстиями под болты крепления вибратора к корытообразному основанию, опалубке или другим элементам конструкции, через которую колебания передаются частицам бетонной смеси.

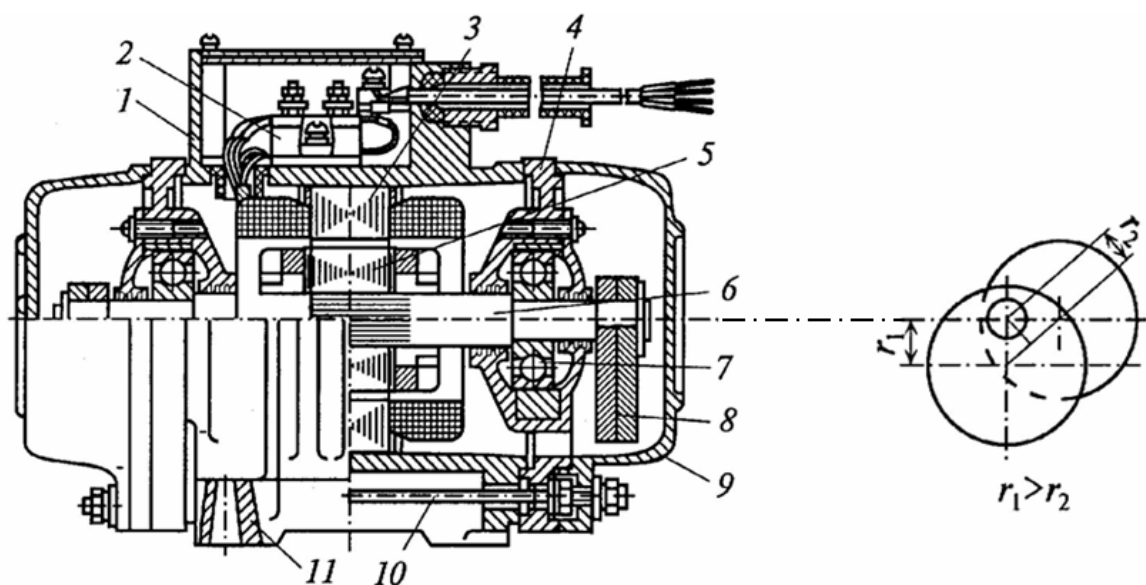


Рисунок 18.3 - Электромеханический дебалансный одновальный вибратор ИВ-70 с круговыми колебаниями: а - общий вид; б - схема регулирования дебаланса; 1 - корпус; 2 - клеммная коробка; 3 - обмотка статора; 4 - щиты; 5 - ротор; 6 - вал; 7 - подшипник; 8 - дебалансы; 9 - крышки; 10 - шпильки; 11 - установочные лапы

При поверхностном уплотнении бетонной смеси основание вибратора передает эффективные колебания на глубину до 20 см. Поверхностный вибратор, установленный на рейке, может служить для разравнивания и поверхностного уплотнения бетонной смеси на большой площади. Вибратор, отсоединенный от рейки и основания, может быть использован в качестве наружного вибратора для сообщения колебаний опалубке, желобу, стенке бункера. Он имеет два сдвоенных дебаланса, которые представляют собой стальные цилиндрические детали, эксцентрично укрепленные на валу. Так как центр массы дебаланса смещен относительно оси вала, то при вращении вала и дебалансов возникает центробежная сила инерции, которая и сообщает вибратору вынужденные колебания. Частота колебаний равняется

частоте вращения дебалансов, а амплитуда колебаний зависит от массы колеблющихся частей и статического момента массы дебалансов, под которой подразумевают произведение массы дебалансов на эксцентриситет массы, т. е. на расстояние от оси вращения до центра массы дебалансов.

Так как наружный дебаланс в каждой паре имеет четыре шпоночных паза, его можно установить под разными углами по отношению к внутреннему, изменяя общий эксцентриситет массы сдвоенного дебаланса. Когда оси дебалансов совпадают, эксцентриситет массы наибольший. При увеличении угла эксцентриситет массы уменьшается, так как общий центр массы для раздвинутых дебалансов лежит посередине линии, соединяющей центры массы каждого дебаланса, и отстоит от оси вращения на меньшем расстоянии, ибо катет прямоугольного треугольника меньше гипотенузы. Соответственно уменьшаются статический момент массы дебалансов и вызываемая ими вынуждающая сила.

Вибратор ИВ-70 при частоте 2800 мин^{-1} и соответствующей установке наружных дебалансов генерирует вынуждающую силу, равную 2; 2,5; 3,15 и 4 кН. Питание электродвигателя осуществляется от сети переменного трехфазного тока напряжением 220/380 В и частотой 50 Гц. Мощность электродвигателя 0,4 кВт, масса вибратора 20 кг. При непосредственном обслуживании вибратора, например при поверхностном уплотнении бетонной смеси, напряжение 220/380 В представляет большую опасность для обслуживающего персонала. В этом случае используют аналогичный по устройству вибратор ИВ-68, развивающий при частоте 1400 мин^{-1} вынуждающую силу в 5 кН и имеющий электродвигатель, который питается током напряжением 36 В от понижающего трансформатора. Наружные вибраторы прикрепляют к опалубке, течкам, бункерам. Их электродвигатели питаются током непосредственно от сети напряжением 220/380 В и не требуют понижающих трансформаторов, что особенно удобно при использовании большого числа вибраторов.

Внутренние (глубинные) вибраторы применяют для уплотнения бетонной смеси при изготовлении крупных сборных строительных элементов, насыщенных арматурой, а также при сооружении монолитных железобетонных конструкций. Их работа весьма эффективна, так как корпус вибратора воздействует непосредственно на бетонную смесь. Внутренние вибраторы изготавливают со встроенным электродвигателем, который вращает дебалансный вал в корпусе, и с вынесенным электродвигателем, передающим вращение виброэлементу гибким валом.

18.4 Эксплуатация и ремонт электрических ручных машин

Правила техники безопасности эксплуатации электрических машин, а также ремонт и испытание после ремонта - общие для всех видов машин и оборудования с электрическим приводом. Однако есть дополнительные

требования, предъявляемые к ручным электрическим машинам, в особенности к машинам с двойной изоляцией (II класса):

ручные машины (вне рабочего времени) должны храниться в сухих отапливаемых помещениях;

должен быть организован учет рабочего времени;

при выдаче машины в работу ее необходимо осмотреть, проверить на холостом ходу четкость работы выключателя, а также исправность (сопротивление) изоляции мегомметром на 500 В при включенном выключателе;

запрещается выдавать в работу машину, а также необходимо прекратить работу в случаях обнаружения трещин на корпусных деталях и рукоятке, повреждения крышек щеткодержателя, нечеткой работы выключателя, повреждения штепсельного соединения, кабеля или его защитной трубки, кругового огня на коллекторе, дыма или запаха, характерного для горящей изоляции;

запрещается работать в помещениях взрывоопасных или с химически активной средой, разрушающей изоляцию, а также на открытых площадках во время выпадения осадков (дождь, снег);

оператор должен соблюдать предельно допустимую продолжительность работы и не допускать перегрузок, сверх указанных в паспорте, а также не подвергать машину ударам. Следует иметь в виду, что при увеличении нагрузки (усилении подачи) сверх паспортной на машину с асинхронным двигателем, имеющим «жесткую» характеристику, он будет опрокидываться (останавливаться), что вызовет, в конечном счете, преждевременное сгорание обмотки. Коллекторный двигатель имеет «мягкую» характеристику, поэтому он будет снижать обороты. При этом увеличивается потребляемая мощность, в результате двигатель будет перегреваться сверх допустимой нормы, а производительность снизится, так как обороты шпинделя не будут оптимальными;

необходимо следить за температурой корпуса двигателя, которая не должна превышать 60°C (практически, если ладонь руки не выдерживает прикосновения к корпусу двигателя, то он перегрелся сверх нормы);

ежедневно после окончания работы машины нужно очищать от загрязнений, а при необходимости подтягивать крепежные детали.

При эксплуатации ручных машин с двойной изоляцией необходимо помнить, что:

заземлять их нельзя;

применения индивидуальных средств защиты (резиновые коврики, диэлектрические перчатки) не требуется;

разрешается производить работы в помещениях и на открытых площадках с земляным, бетонным, асфальтовыми, металлическими, деревянными и другими полами, а также на металлоконструкциях, в котлах, трубах и т. п.;

машины можно использовать при температуре от -35°C до + 35°C и относительной влажности до 90% при температуре +20°C;

через каждые 50 ч работы рекомендуется очищать коллектор и щеточный механизм от скопившейся угольной пыли; продувать машину очищенным сжатым воздухом под давлением до 0,15 мПа;

необходимо периодически проводить контроль машин. Контроль ручных машин с двойной изоляцией необходимо проводить через каждые 100 ч работы, но не реже одного раза в три месяца. Контроль необходим также при каждой смене щеток.

При контроле машину с двойной изоляцией разбирают и при этом:

удаляют скопившуюся токопроводящую пыль, проверяют мегомметром рабочую и дополнительную изоляцию (сопротивление каждой из них должно быть не менее 2 МОм), токопроводящую пыль удаляют сжатым воздухом при давлении до 0,15 мПа и протирают изоляционные поверхности технической салфеткой, смоченной в бензине;

осматривают корпусные детали, токоподводящий кабель и штепсельное соединение;

после сборки машины проводят испытание электрической прочности изоляции машины при включенном выключателе напряжением 2500 В, частоты 50 Гц в течение 1 мин на высоковольтной установке, например прибором УПУ-1М (электроды при испытании прикладывают к одному из контактов штепсельной вилки и к металлическим деталям машины, доступным для прикосновения во время работы);

если при контроле машины будут обнаружены какие-либо дефекты, то она должна быть сдана в ремонт.

Ремонт машин проводится только в специализированной мастерской подготовленным для этого персоналом. После проведения ремонта каждую машину подвергают испытаниям в лабораторных условиях.

Выводы

1. Электрическая ручная машина приводится в движение специально изготовленным для нее электродвигателем или электромагнитом, составляющим с машиной единое целое.

2. В электрических ручных машинах применяются специально изготовленные для них электродвигатели, работающие на напряжении 36 В или 220 В. В передвижных машинах используют также электродвигатели общего назначения на напряжение 380/220 В.

3. Промышленность выпускаются электрические ручные машины трех классов исполнения по напряжению и изоляции.

4. Силовое электрооборудование электрических ручных машин строится на основе только электродвигателей вращательного движения, либо на базе только возвратно-поступательных двигательных устройствах, либо

представляет собой комбинированный электромеханизм с вращающимся ударным элементом возвратно-поступательного действия.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите, какие виды механизмов и ручных машин, оснащенных электроприводом, применяются в строительном производстве.
2. Охарактеризуйте типы электродвигателей, применяемых в электрических ручных машинах. Объясните особенности их маркировки.
3. Каких классов исполнения по напряжению и изоляции выпускают электрические ручные машины?
4. Охарактеризуйте особенности изоляции электрических ручных машин первого класса и мероприятия по безопасности работы.
5. Охарактеризуйте особенности изоляции электрических ручных машин второго класса и мероприятия по безопасности работы.
6. Охарактеризуйте особенности изоляции электрических ручных машин третьего класса и мероприятия по безопасности работы.
7. Объясните устройство ручной электрической сверлильной машины.
8. Объясните схему электромагнитного перфоратора.
9. Какие электрические ручные машины относят к вибраторам? Охарактеризуйте их типы и назначение.
10. Какими особенностями характеризуются электромеханические вибраторы центробежного типа?
11. Объясните устройство и принцип действия электромеханического дебалансного вибратора ИВ-70.
12. Какими особенностями характеризуются внутренние вибраторы?
13. Охарактеризуйте правила безопасности при работе с электрическими ручными машинами.
14. Какие правила безопасности следует соблюдать при ремонте электрических ручных машин?

19 ЭЛЕКТРОПРОГРЕВ БЕТОНА И ГРУНТА

Ключевые понятия: электропрогрев бетона (электродный, индукционный, инфракрасный, косвенный), электропропаривание, электропрогрев грунта.

На тепловую обработку бетона теряется около 70% времени, требуемого для изготовления железобетонных изделий. Поэтому на практике применяются различные методы тепловой обработки бетона, обеспечивающие снижение времени на эту операцию. К таким методам относится электрический нагрев как в процессе формирования бетонной смеси, так и во время нахождения ее в формах. При наличии предварительного электропрогрева бетонной смеси и форм время тепловой обработки бетона может быть снижено до нескольких часов.

19.1 Электропрогрев бетона

Существует несколько методов электротермообработки бетона.

Электродный сквозной - электроды помещаются вертикально в толщу бетона. Применяется для сборных и монолитных фундаментов, стен, блоков. **Электродный периферийный** - электроды закрепляются в опалубке в специальных щитах или термоактивном слое опилок, смоченных раствором хлористого натрия (NaCl). Применяется для одностороннего прогрева конструкций толщиной более 20 см или двустороннего - до 20 см.

Индукционный - изделие помещается в переменное магнитное поле, образованное электрической обмоткой, и нагревается вихревыми токами. Применяется при прогреве сборных и монолитных конструкций: колонн, балок, рам, стволов, труб и т. д.

Инфракрасный прогрев высокотемпературными нагревателями с помощью ламп накаливания, трубчатых, проволочных и других нагревателей. Данный вид прогрева применяется для монолитных конструкций сложной конфигурации, а также при сушке изделий.

Косвенный прогрев низкотемпературными нагревателями с помощью трубчатых, плоских, струнных и других нагревателей, вмонтированных в опалубку или маты. Применяется для всех видов изделий.

Инфракрасный прогрев в камерах с излучающими поверхностями. Применяется при изготовлении плит и панелей.

Электропрогрев бетонной смеси вне формы, при котором смесь в горячем состоянии укладывается в форму. Применяется для возведения монолитных конструкций и при изготовлении изделий в заводских условиях.

Прогрев электродным способом может производиться только переменным током, так как постоянный ток вызывает необратимые химиче-

ские реакции, изменяющие структуру бетона. Сопротивление бетона зависит от его удельного сопротивления, поверхности соприкосновения с бетоном и расстояния между электродами. Электропроводность бетона, зависящая от содержания в нем влаги, по мере твердения бетона уменьшается. Для поддержания расчетного тепловыделения в бетон вводят различные примеси - CaCl , NaCl , ускоряющие твердение и уменьшающие сопротивление бетона.

Применяемые при прогреве электроды подразделяют на пластинчатые, полосовые, стержневые и струнные (рис. 19.1). Для первых двух видов применяется кровельная сталь, для других - прутки диаметром 5–12 мм. Пластинчатые электроды имеют вид пластин, целиком или частично закрывающих противоположные плоскости по толщине изделия. Струнные электроды закрепляются вдоль оси длинномерных конструкций. Расстояния между электродами берутся в соответствии с рисунком 19.1.

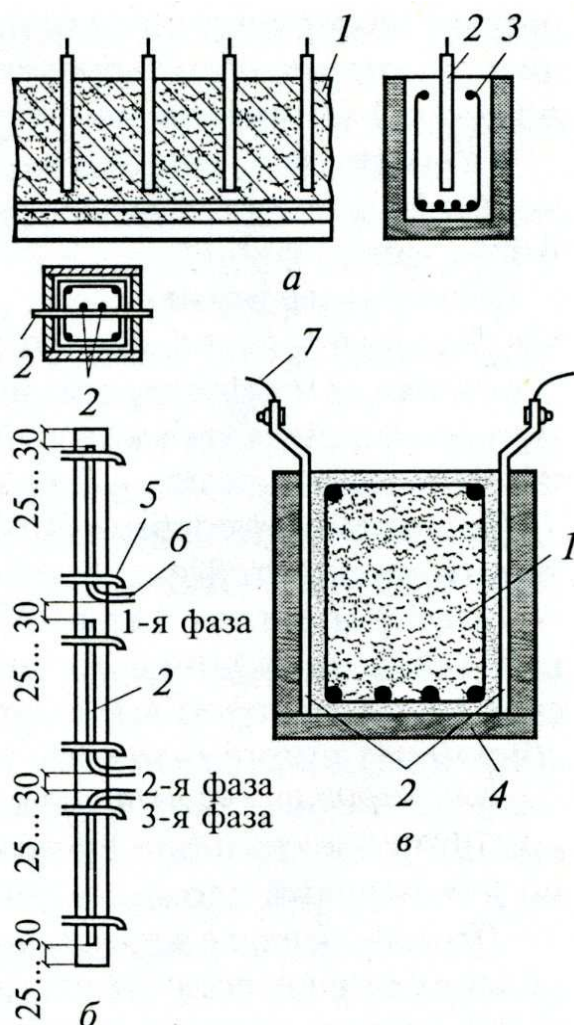


Рисунок 19.1 - Электродный метод электропрогрева бетона: а - при помощи стержневых электродов; б - струнных; в - пластинчатых; 1 - бетон; 2 - электроды; 3 - арматура; 4 - опалубка; 5 - крюки; 6 - выходы электродов для присоединения к питающей сети; 7 - провод

Особенно важным является электропрогрев в зимнее время. Замерзание бетона в процессе твердения снижает его прочность, причем тем больше, чем раньше он был заморожен. По достижении бетоном 50-60% прочности замораживание не влияет на конечную прочность бетона. Исходя из этого, выбирают режим прогрева.

Длительный режим применяется для массивных конструкций, ускоренный режим - для облегченных конструкций, промежуточный режим - для остальных видов конструкций.

Кроме того, возможен ступенчатый режим с несколькими изотермическими ступенями (применяется для монолитных и сборных предварительно нагруженных конструкций), режим «изотермический прогрев и остывание», при котором прогрев осуществляется по методу электроразогрева вне формы (применяется для монолитных конструкций), саморегулирующийся

режим с постоянным напряжением тока пригрева (для массивных конструкций), импульсный режим с попеременным отключением тока. Максимальная температура процесса ограничивается предельно допустимой для определенной марки бетона (обычно 40–80°С).

Электропрогрев бетона производится при помощи специальных трехфазных трансформаторов с масляным охлаждением с изменением напряжения ступенями.

Наряду с трехфазными могут быть использованы однофазные, в том числе сварочные, трансформаторы, подключаемые трехфазными группами. Сварочные трансформаторы рассчитаны на повторно-кратковременный режим, и их непрерывная нагрузка при прогреве должна составлять 60–70% номинальной.

Электропроводку от понизительных трансформаторов до места электропрогрева выполняют только изолированными проводами с креплением на деревянных опорах, на изоляторах или специальных переносных опорах в виде козел. Во избежание потерь в линиях трансформаторы должны располагаться как можно ближе к электродам в месте прогрева бетона. Контакты соединительных проводов с электродами и с другими проводами обеспечиваются с помощью болтов или съемных зажимов.

Перед включением вторичной сети трансформатор проверяют в режиме холостого хода, при этом проверяют также возможность регулировки вторичного напряжения. Во время работы следует следить с помощью амперметров или измерительных клещей за равномерной нагрузкой на фазах.

По мере твердения бетона его сопротивление уменьшается. Для поддержания тока следует уменьшать напряжение на выходе трансформатора.

Измерение температуры бетона при электропрогреве производят термометрами в скважинах, заранее заготовленных, не менее трех в каждом конструктивном элементе. В первые 5–6 часов температуру измеряют через каждый час, в последующие 18 часов - через 2 часа, и в остальное время - 2 раза в смену.

Для электропрогрева бетона, кирпичной кладки, оштукатуренных поверхностей используются внешние источники тепла.

Электропрогрев изделий с использованием внешних источников тепла, в отличие от электродного прогрева, происходит за счет тепла, которое выделяется вне конструкции и передается бетону через промежуточные материалы (опилки, воду, воздух, пар, металлические стенки) или же за счет лучеиспускания. Так как внешний электропрогрев ниже электродного, он применяется только для изделий сложной конфигурации.

Прогрев бетона электрическими печами сопротивления. В электрических печах сопротивления, применяемых для косвенного прогрева бетона, нагревательным элементом служит нихромовая или фехрелевая

проволока. Простейшая отражательная печь, предназначенная для электропрогрева бетонных и железобетонных изделий небольшой толщины, представляет собой деревянный желоб параболической формы из шпунтованных досок толщиной 40 мм.

Для прямого электропрогрева используют инвентарные электрощиты. Электрощит представляет собой раму из уголков, внутри которой на стальном листе толщиной 1 мм по слою тонкой изоляции уложена нагревательная стальная или нихромовая проволока. Сверху проволока изолирована листовым асбестом и слоем минеральной ваты толщиной 20–30 мм, защищенным листом кровельного железа. При прогреве несколько таких щитов включаются последовательно. Температура бетона регулируется включением в цепь разного числа электрощитов.

Для прогрева железобетонных труб и колец используют цилиндрические печи с нагревательной спиралью, намотанной на кусок асбоцементной трубы.

Электропрогрев при помощи термоактивного слоя. Прогреваемую конструкцию покрывают слоем опилок, смоченных для повышения электропроводности слабым раствором соли (3–5%). В опилки закладывают электроды из круглой или полосовой стали, включаемые в сеть. При включении тока опилки нагреваются, и тепло передается конструкции. Для увеличения электропроводности опилок их после засыпки слегка прессуют. Температура опилок поддерживается на уровне 80–90°C. Необходимая мощность в период подъема температуры составляет 7–8 кВт на 1 м³ бетона, а расход электроэнергии на прогрев такого же объема бетона достигает 120–160 кВт·ч.

Прогрев при помощи термоформ с нагревательными элементами. При электропрогреве сборных железобетонных изделий применяют панели из токопроводящей резины. Электропроводность такой резины создается за счет большого содержания в ней сажи. Нагревательные панели имеют средний токопроводящий слой толщиной 2 мм, в который заделаны электроды из латунной сетки или полосы, и два наружных слоя из обычной резины толщиной 0,5 мм. Важным преимуществом этого способа является герметизация изделия в процессе его прогрева, исключая испарение влаги из бетона.

Электропропаривание. Паровая среда в пропарочной камере создается с помощью электрических нагревательных элементов - спиралей или электродов, установленных в нижней части камеры. Мощность нагревательных устройств определяется из расчета 7-8 кВт на 1 м³ прогреваемых изделий. К нагревателям подается сетевое напряжение. Для ускорения нагрева изделия рекомендуется применять вместо воды 0,5%-ный раствор поваренной соли. Способ электропропаривания железобетонных изделий применяется для изделий сложной конфигурации.

Электропрогрев инфракрасными лучами. При инфракрасном прогреве, в отличие от других способов внешнего обогрева бетона, обеспечивается непосредственная передача тепловой энергии от источника излучения к нагреваемому изделию. В качестве источников инфракрасного излучения используются лампы накаливания типа ЗН мощностью 300 и 500 Вт при напряжении 127 и 220 В. Применяются также обычные лампы накаливания мощностью 200–500 Вт.

Мощность, необходимая для электропрогрева бетона, является одним из основных факторов, определяющих выбор электрооборудования и расчет питающей сети. Она зависит от модуля поверхности прогреваемой конструкции, температуры прогрева, температуры наружного воздуха, начальной температуры бетона, конструкции опалубки, эффективности утепления и особенно от скорости разогрева бетона.

В качестве источников питания для электропрогрева применяют, как правило, трансформаторы. При электротермообработке бетона для поддержания заданного режима применяют трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения, автотрансформаторы и индукционные регуляторы. Трансформаторы выбирают по мощности и напряжению.

Выпускается комплектная трансформаторная подстанция наружной установки КТП-ОБ-63У1, предназначенная для электропрогрева грунта и бетона. В КТП установлен трансформатор ТМОБ-63 номинальной мощностью 63 кВА.

Ориентировочный расчет расхода электроэнергии (W) и требуемой мощности (P) для электропрогрева бетона производится соответственно по формулам:

$$W = W_{\text{уд}} V; \quad P = \rho V, \quad (19.1)$$

где $W_{\text{уд}}$ - удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м³;

ρ - удельная мощность на 1 м³ бетона, кВт/м³;

V - объем бетона, м³.

Удельный расход электроэнергии $W_{\text{уд}}$ (кВт·ч/м³) при прогревании бетона различными способами составляет:

при электродном способе прогрева	80–120;
при индукционном способе прогрева	120–150
при инфракрасном способе прогрева	100–200.

Пределы удельной мощности представлены в таблице 19.1.

Таблица 19.1 – Удельная мощность для электропрогрева бетонных конструкций, кВт/м³

Температура воздуха, °С	Температура прогрева, °С	
	40	80
0	7,7–9,3/15,6–18	8,3–10,4/16,2–19,2
-5	8,2–10,1/16,1–18,9	8,7–11,2/16,6–20
-30	8,6–10,9/16,5–19,7	9,1–12/15–25

Примечание. До черты указаны пределы удельной мощности при скорости повышения температуры при нагреве 10°С/ч, после черты – 20°С/ч.

19.2 Электропрогрев грунта

Электропрогрев грунтов применяют в тех районах, в которых имеется свободная электрическая мощность (например, вблизи мощных гидростанций).

Существует несколько способов электропрогрева грунтов, из которых наиболее удобным, дешевым и безопасным является электродный способ с непосредственным подключением установок электропрогрева к существующим электросетям напряжением до 380 В.

Электродный способ заключается в том, что через грунт пропускается электрический ток напряжением 220 или 380 В. Электропроводность грунта зависит от степени его влажности, состояния и температуры, наличия в грунте растворов солей, кислот, от строения грунта и т. п. Сложность строения грунта и происходящие в нем физические явления и изменения, связанные с тепловыми процессами, значительно влияют на его электрическое сопротивление.

Поверхность прогреваемого участка грунта засыпается на 15–25 см слоем опилок, смоченных водным раствором соли (поваренной, хлористого кальция) или соляной кислоты, имеющими назначение первоначально проводить ток и утеплять грунт. Даже при напряжении 380 В электрический ток практически не протекает через мерзлый грунт.

При электропрогреве грунта горизонтальными электродами (рис. 19.2, а) тепло передается грунту главным образом от нагревающегося слоя опилок, а участие самого грунта в цепи тока относительно небольшое. Только незначительный верхний слой грунта, прилегающий к электродам, включается в электроцепь и является сопротивлением, в котором выделяется тепло.

Горизонтальные электроды применяются при отоплении грунта на небольшую глубину (до 0,5–0,7 м), а также в тех случаях, когда вертикальные электроды неприменимы вследствие малой электропроводности грунта или невозможности забивки их в грунт, смешанный, например, со щебнем.

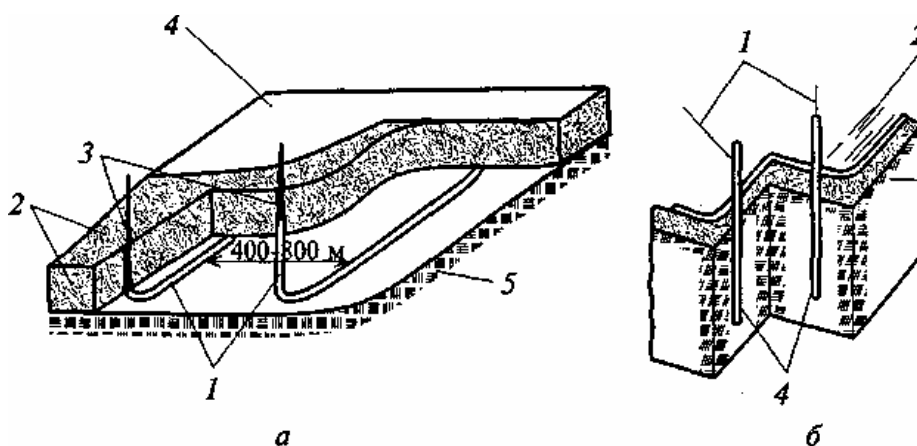


Рисунок 19.2 - Электропрогрев грунта:

а - горизонтальными электродами: 1 - электроды; 2 - опилки, смоченные раствором соли; 3 - подводка электроэнергии; 4 - верхнее утепление (толь, маты и т.п.); 5 - грунт; *б* - вертикальными электродами: 1 - подвод электроэнергии; 2 - опилки с утеплителем; 3 - грунт; 4 - электроды

Отогрев вертикальными электродами (рис. 19.2, *б*) более эффективен и применяется при глубине мерзлого грунта более 0,7 м, а также при малом контакте между горизонтальными электродами и грунтом. В твердые грунты (глинистые и песчаные с влажностью, превышающей 15–20%) электроды забиваются на глубину 20–25 см, а затем осаживаются по мере оттаивания грунта. При оттаивании на глубину 1,5 м рекомендуется иметь два комплекта электродов - короткие и длинные. По мере оттаивания грунта короткие электроды заменяются длинными. Отогрев грунта на глубину 2 м и более следует производить ступенями с периодическим удалением оттаявших слоев при выключенном токе.

При вертикальных электродах грунт засыпается опилками, которые сначала служат побудителем к прогреву верхнего слоя грунта. По мере оттаивания слои грунта включаются в цепь, после чего опилки только уменьшают теплопотери оттаиваемого грунта. Вместо опилок побудителем могут служить бороздки, пробитые зубилом между всеми электродами на глубину 6 см и залитые раствором соли. При покрытии поверхности отогреваемого грунта слоем сухих опилок, как показывает практика, устройство бороздок дает очень хорошие результаты.

В целях экономии электроэнергии и максимального использования мощности средняя положительная температура прогреваемого грунта не должна превышать 2–5°C, в отдельных точках – 15–20°C. Прогрев следует вести участками с перерывами в питании их током.

Требуемая мощность и расход энергии при температуре грунта 15°C в среднем на каждый кубический метр составляют 3,5 кВт при расходе электроэнергии 30 кВт·ч.

За последние годы разработан и внедрен в производство в северных районах отогрев грунта электроэнергией напряжением до 10 кВ. По сравнению с напряжением 380 В применение для электропрогрева мерзлого

грунта электродов с напряжением 10 кВ позволяет ускорить производство работ и сокращает их стоимость. Необходимое количество электродов уменьшается, а расстояние между ними увеличивается. Сокращается объем подготовительных работ по погружению электродов в грунт. Основное количество тепла выделяется около электродов, остальная часть грунта прогревается до отрицательной температуры, близкой к 0°С за счет тепловой энергии, аккумулированной около электродов. Грунт прогревается снизу вверх, за счет этого уменьшаются потери тепла в атмосферу. Прогрев мерзлого грунта до температуры от -1,5 до -0,5°С создает весьма благоприятные условия для его разработки землеройными механизмами, так как при полном оттаивании грунт примерзает к ковшу экскаватора или отвалу бульдозера. Кроме того, увлажненный грунт, удаленный в отвал, смерзается, что вызывает дополнительные затраты при его погрузке в транспортные средства или при обратной его засыпке.

19.3 Техника безопасности при электропрогреве

Техника безопасности при электропрогреве мерзлого грунта при напряжении до 10 кВ заключается в полном исключении попадания людей и животных в зону опасных шаговых напряжений. Многократными измерениями установлены величины шаговых напряжений в грунтах при рабочем напряжении на электродах 10 кВ. Безопасное шаговое напряжение 40 В наблюдается, как правило, на расстоянии 9–10 м от электродов, участвующих в прогреве грунта. Напряжения измерялись между вертикальными контрольными электродами, заглубленными в грунт на 1,5 м и на 5–7 м.

Ограждение опасной зоны электропрогрева предполагает расположение на расстоянии 15 м от крайних рабочих электродов многоярусного мягкого веревочного барьера, укрепленного на инвентарных деревянных опорах. Концы веревок крепятся к рычагам конечных выключателей, устанавливаемых на опорах. Конечные выключатели срабатывают при натяжении любой из горизонтальных веревочных преград, что вызывает отключение напряжения подводимого к установке электропрогрева грунта.

Выводы

1. Электрический прогрев бетона является эффективным методом, обеспечивающим снижение времени изготовления изделий из бетона и повышения их качества.
2. Для электропрогрева бетона удобно применение сварочных трансформаторов.

Вопросы для самопроверки

1. Какими методами осуществляется электротермообработка бетона?
2. Охарактеризуйте электродный сквозной и периферийный методы электротермообработки бетона.
3. Какие электроды применяются при прогреве бетона?
4. Охарактеризуйте индукционный метод электротермообработки бетона.
5. Какие трансформаторы применяются для электропрогрева бетона?
6. Как изменяется сопротивление бетона по мере его твердения? Как поддерживается значение прогрева?
7. Как осуществляется измерение температуры бетона при электропрогреве?
8. В каких случаях для электропрогрева бетона используют внешние источники тепла?
9. Как осуществляется прогрев бетона электрическими печами сопротивления?
10. Как формируют термоактивный слой для электропрогрева бетона?
11. Охарактеризуйте особенности технологии электропропаривания бетона.
12. Охарактеризуйте особенности электропрогрева бетона инфракрасными лучами.
13. Какую электроаппаратуру используют в качестве источников питания для электропрогрева бетона? Дайте ее характеристику.
14. Как рассчитать расход электроэнергии и требуемой мощности для электропрогрева бетона?
15. Какие способы электропрогрева грунтов Вам известны?
16. Охарактеризуйте электродный способ электропрогрева грунтов.
17. Как осуществляется электропрогрев грунта горизонтальными электродами? В каких случаях он применяется?
18. Как осуществляется электропрогрев грунта вертикальными электродами? Охарактеризуйте особенности данного метода.
19. Охарактеризуйте основные правила техники безопасности при электропрогреве.

20 ЭЛЕКТРООСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Ключевые понятия: сила света, световой поток, освещенность, источники света, лампа накаливания, газоразрядная лампа, люминесцентная лампа, ртутная лампа, осветительная арматура, светильник, метод удельной мощности.

20.1 Общие сведения

Правильная организация электрического освещения на строительной площадке имеет существенное значение для успешного выполнения строительно-монтажных работ, особенно в осенне-зимний период при сокращении светлого времени суток. Недостаточная освещенность рабочего места снижает производительность труда, ухудшает качество работы и, кроме того, во многих случаях является причиной травматизма.

Достаточность освещения и его качество оцениваются показателями, для определения которых служат световые величины и единицы их измерения. В Международной системе единиц (СИ) основной световой величиной является **сила света** (обозначается латинской буквой J). Е единица ее измерения - **кандела** (кд). Вторая, не менее важная световая величина - **световой поток** (обозначается латинской буквой F). Единица его измерения - **люмен** (лм).

Достаточность освещения на той или иной плоскости или в той или иной точке определяется величиной **освещенности** (обозначается латинской буквой E). Единица измерения освещенности - **люкс** (лк).

Для выполнения точных работ в механических мастерских по нормам требуется освещенность в 100–150 лк, а для чтения - порядка 75 лк.

Строительными нормами и правилами (СНиП) установлены минимальные величины освещенности, необходимые для тех или иных производственных, служебных и бытовых помещений. На их основе разработаны нормы электрического освещения строительных и монтажных работ (табл. 20.1).

Таблица 20.1 – Нормы освещенности строительных и монтажных работ

Наименование участков территории и рабочих операций	Освещенность E , лк	Плоскость, в которой нормируется освещенность	Примечание
1	2	3	4
Территория строительной площадки в районе производства работ	2	Горизонтальная на уровне земли	Освещение должно быть многосторонним
Автомобильные дороги на территории строительства с интенсивным движением	3	То же	-

Продолжение таблицы 20.1

1	2	3	4
Железнодорожные пути на территории строительства	0,5	-	-
Земляные работы, производимые землеройными механизмами	5-10	Горизонтальная, вертикальная	-
Монтаж строительных конструкций	25	Горизонтальная, вертикальная	-
Бетонирование	25	На поверхности бетона	-
Отделочные работы	50	На рабочей поверхности	-
Крановые и такелажные работы	10	Горизонтальная	-
Сборка и монтаж строительных механизмов	50	То же	Необходимы дополнительные переносные осветительные средства
Монтаж оборудования	50	На рабочих поверхностях	То же

Освещение может быть общим, местным и комбинированным. При этом общее освещение подразделяется на равномерное и локализованное.

При общем равномерном освещении освещается все помещение или наружная площадка, светильники устанавливаются равномерно. При общем локализованном освещении на отдельных участках помещения или наружной территории создается большая освещенность. На таких участках устанавливаются дополнительные светильники или они размещаются более часто. При местном освещении освещаются только рабочие поверхности. При комбинированном - применяется как общее, так и местное освещение.

В условиях строительства применяется как общее (равномерное и локализованное), так и комбинированное освещение мест работы (последнее - в ремонтных заводах, мастерских и других подобных помещениях).

Кроме обычного, рабочего, освещения, устраивается аварийное освещение, обеспечивающее минимальную освещенность. Для аварийного освещения устраивается отдельное питание.

20.2 Источники света и осветительная арматура

20.2.1 Источники света. В качестве источников света на строительстве и в промышленности применяют лампы накаливания и газоразрядные лампы, которые, в свою очередь, подразделяются на ртутные лампы низкого давления - люминесцентные и ртутные лампы высокого давления - лампы ДРЛ.

В лампах накаливания световая энергия получается за счет нагревания тонкой вольфрамовой нити проходящим по ней электрическим током. Нить помещена в стеклянную колбу, заполненную инертным газом; имеются также конструкции ламп накаливания, у которых нить помещена в вакууме - из колбы откачен воздух. Раскаленная (при температуре порядка 3000°C) нить ярко светится. Колба лампы укреплена на металлическом резьбовом цоколе, с помощью которого лампа ввертывается в патрон, служащий для ее подсоединения к проводам электросети. Лампы накаливания выпускают на напряжения 220, 127, 36 и 12 В. На стройках, как правило, применяют лампы на 220 В. Их выпускают мощностью от 15 до 1500 Вт. Лампы накаливания для напряжений 36 и 12 В выпускают мощностью от 11 до 100 Вт.

При понижении напряжения световой поток и светоотдача ламп накаливания резко снижаются. Повышение напряжения сверх 105% номинального значительно уменьшает срок службы лампы.

Действие **газоразрядных ламп** основано на электрическом разряде в среде разреженного газа. По сравнению с лампами накаливания они характеризуются меньшим потреблением электрической энергии.

Люминесцентная лампа (рис. 20.1, а) представляет собой длинную (порядка 450–1500 мм) стеклянную трубку с двумя цоколями на концах, заполненную разреженным газом аргоном и небольшим количеством паров ртути. На внутреннюю поверхность трубки нанесен слой специального состава - люминофора. В цоколи лампы впаяны вольфрамовые электроды. При включении лампы в электрическую сеть между ее электродами в парах ртути в трубке возникает газовый разряд, и невидимое ультрафиолетовое излучение, под воздействием которого люминофор начинает светиться, дает яркий видимый свет. Люминесцентные лампы включаются в сеть с помощью специальных пускорегулирующих устройств (ПРУ).

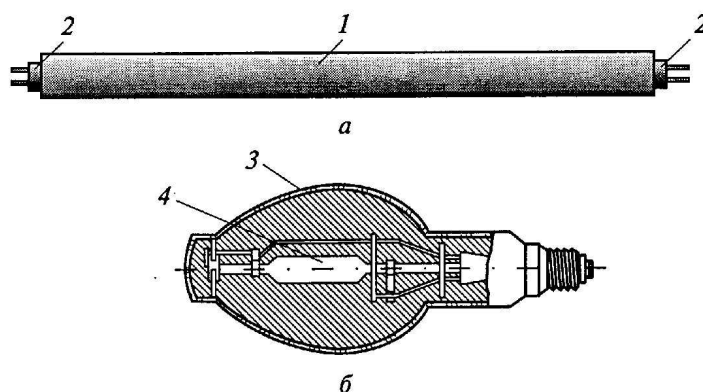


Рисунок 20.1 - Газоразрядные лампы:
а - люминесцентная; б - ртутная; 1 - трубка; 2 - цоколь;
3 - баллон лампы; 4 - горелка из кварцевого стекла

Люминесцентные лампы выпускают мощностью в 15, 20, 30, 40 и 80 Вт, пяти типов по цветности (окраске) излучаемого света: ЛДЦ - днев-

ного света, предназначенные для правильной светопередачи; ЛД - дневного света; ЛХБ - холодного белого света; ЛТБ - теплого белого света и ЛБ - белого света.

По светоотдаче на 1 Вт мощности все люминесцентные лампы значительно (в 2,5–4 раза) превосходят лампы накаливания. Наибольшей светоотдачей обладают лампы белого света (ЛБ), они рекомендуются для освещения всех производственных помещений, кроме тех, в которых требуется правильное различение цветовых оттенков.

Ртутная лампа высокого давления типа ДРЛ по внешнему виду похожа на крупную лампу накаливания. Ее устройство показано на рисунке 20.1, б. В отличие от люминесцентной лампы в лампе ДРЛ электрический разряд в ртутных парах происходит не во всей колбе, а в маленькой трубке («горелке») из кварцевого стекла, прозрачного для ультрафиолетовых лучей (рис. 20.1, б). Под влиянием ультрафиолетового излучения горелки специальный люминофор, нанесенный на внутреннюю поверхность колбы, дает яркий, слегка зеленоватый свет, близкий к белому.

Лампы ДРЛ имеют резьбовой цоколь и ввинчиваются в те же патроны, что и лампы накаливания. Однако в сеть они включаются так же, как и люминесцентные, по особой схеме с помощью специальных пускорегулирующих аппаратов (ПРА), содержащих дроссель, конденсаторы, разрядник и др.

Выпускают лампы ДРЛ мощностью 250, 500, 750 и 1000 Вт. Они являются высокоэкономичными источниками света.

20.2.2 Осветительная арматура. Правильно организованное освещение, прежде всего, должно создавать достаточную освещенность для того, чтобы глаз человека мог легко, не утомляясь, различать все детали, необходимые при данной работе. Кроме того, освещение должно быть по возможности равномерным, без резких теней; источник света не должен быть виден непосредственно глазом, чтобы не было слепящего действия.

Для создания необходимых условий освещения, удовлетворяющих указанным требованиям, служит **осветительная арматура**.

Осветительная арматура вместе с помещенной в нее лампой называется **светильником**. Основные типы светильников, применяемых в условиях строительства с лампами накаливания, люминесцентными и ДРЛ, представлены на рисунках 20.2 – 20.5.

Светильники служат для освещения предметов, расположенных на относительно небольших расстояниях. В качестве осветительных приборов дальнего действия применяют прожекторы различных типов. Для освещения строительных площадок служат прожекторы заливающего света, работающие с обычными лампами накаливания мощностью от 200 до 1000 Вт (рис. 20.5).

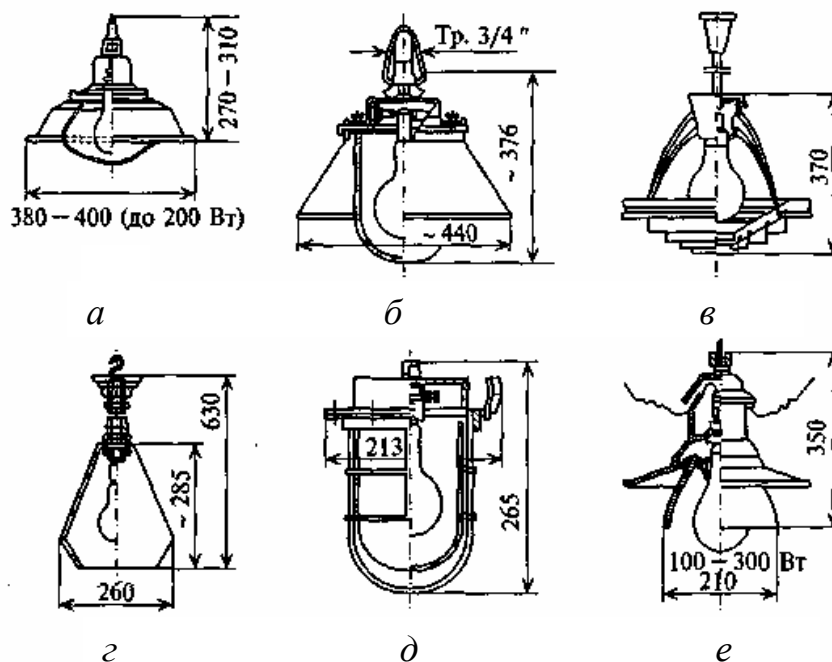


Рисунок 20.2 – Светильники с лампами накаливания:
a – "Универсаль"; *б* – промышленный уплотненный (ПУ); *в* – кольцевой типа ПМ-1;
г – "Люцетта"; *д* – рудничный нормальный (РН-100); *е* – наружного освещения типа СПО

20.3 Установки для электрического освещения

Наружное освещение территории строительных площадок осуществляется преимущественно прожекторами заливающего света. Прожекторы (главным образом, типа ПЗС-35) устанавливают группами по 3...4 и более на мачтах, высота которых зависит от силы света и мощности прожекторов: чем больше сила света прожектора, тем выше он должен быть установлен.

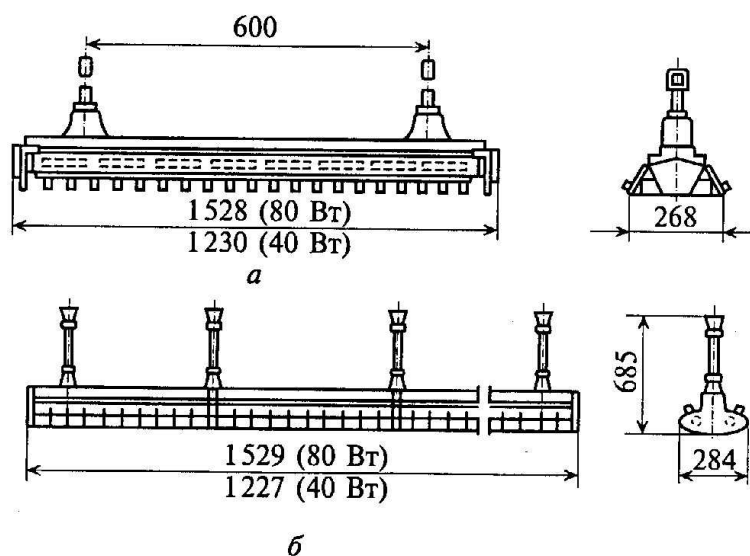


Рисунок 20.3 – Светильники с люминисцентными лампами:
а – типа ОДР и ОДОР с двумя лампами по 40 или 80 Вт;
б – типа ШЛД с двумя лампами по 40 или 80 Вт

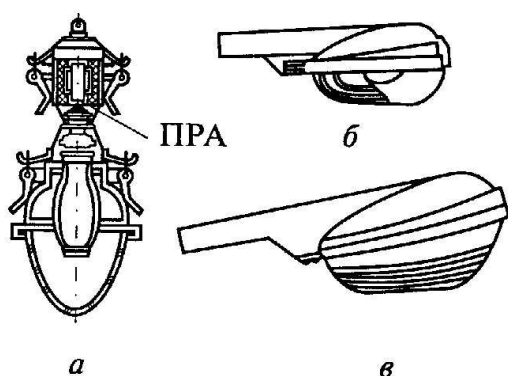


Рисунок 20.4 – Светильники для ртутных ламп типа ДРЛ:
а – подвесного типа;
б, в – консольного типа

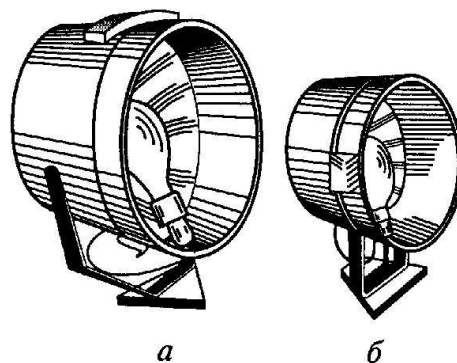


Рисунок 20.5 – Проекторы заливающего света:
а – типа ПЗС-45 с лампой 1000 Вт;
б – типа ПЗС-35 с лампой 500 Вт

При этом оптическая ось прожектора устанавливается почти горизонтально - под углом $8...15^\circ$ вниз по горизонтали. Практически принимается следующая минимальная высота установки прожекторов над уровнем земли: ПЗС-45 с лампой 1000 Вт – 21 м, ПЗС-35 с лампой 500 Вт – 13 м.

Целесообразно применять инвентарные переносные прожекторные мачты. Одна из конструкций таких мачт представлена на рисунке 20.6.

Расстояние между прожекторными мачтами выбирается обычно от 80–100 до 200–250 м (меньшие цифры относятся к прожекторам меньшей мощности).

Для дополнительного освещения рабочих зон применяются инвентарные переносные стойки с прожекторами малой мощности (с лампами 200 Вт) или со светильниками. На рисунке 20.7 представлены такие инвентарные стойки. Кроме того, на экскаваторах и других крупных строительных машинах также обычно устанавливаются прожекторы малой мощности, дополнительно освещающие рабочую зону.

Освещение дорог, не попадающих в зону, освещенную прожекторами, осуществляется светильниками с арматурой наружного освещения СПО или «Универсаль» с лампами мощностью 200–300 Вт. Светильники подвешивают на кронштейнах к опорам (столбам) питающей их воздушной линии на высоте около 6 м от земли и на расстоянии 25–35 м один от другого. Для этой же цели, а также и для освещения отдельных площадок территории строительства с успехом могут применяться светильники с более экономичными ртутными лампами типа ДРЛ.

Общее освещение производственных строительных предприятий осуществляется или лампами накаливания, или люминесцентными лампами при помощи светильников (см. рис. 20.2, 20.3).

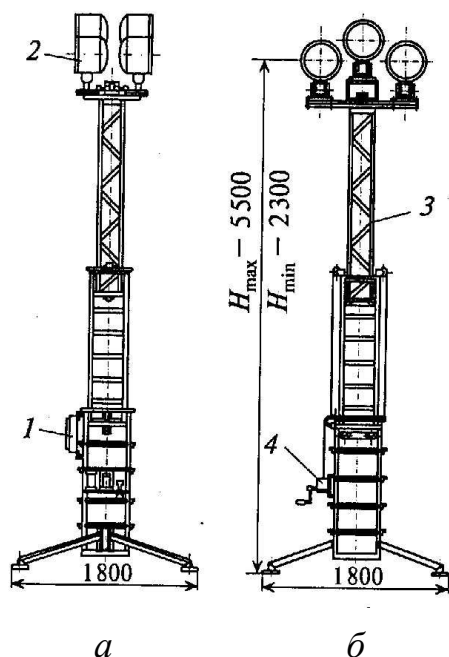


Рисунок 20.6 – Инвентарная телескопическая прожекторная мачта типа ТПМ-6:
а – вид сбоку; *б* – вид спереди;
 1 – распределительный щиток; 2 – прожекторы; 3 – металлоконструкция;
 4 – ручная лебедка

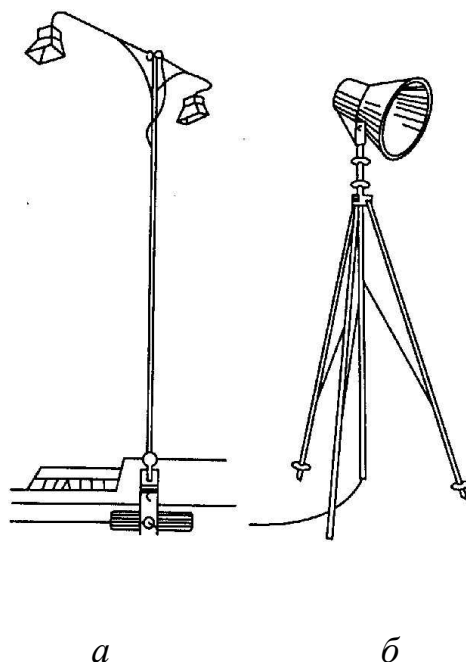


Рисунок 20.7 – Инвентарные стойки со светильниками: *а* – стойка телескопическая типа ИПСК-2 с двумя светильниками для освещения работ по кирпичной кладке; *б* – стойка типа ПТС-2 с одним светильником для местного освещения рабочих зон

Для сухих производственных помещений применяют светильники «Универсаль», кольцевые ПМ-1 с лампами накаливания или светильники типов ОД и ОДР с люминесцентными лампами. Сырые и пыльные помещения освещают уплотненными светильниками типа ПУ или РН с лампами накаливания; могут применяться также светильники «Универсаль». Светильники подвешивают обычно на высоте 2,5–3,5 м над рабочими поверхностями, расстояние между ними принимают примерно равным удвоенной высоте подвеса. Местное освещение рабочих мест в мастерских выполняется при помощи выпускаемых для этих целей светильников АМО-60 и других с лампами накаливания. Для временного освещения строящихся зданий так же используют светильники с лампами накаливания. В дополнение к общему освещению применяют, как правило, местное освещение рабочих зон, для чего используют инвентарные переносные стойки и подвесные устройства со светильниками. По требованиям техники безопасности временное освещение зданий рекомендуется устраивать на пониженном напряжении (36 В), получаемом от понижающих трансформаторов. Если же временное освещение имеет напряжение 220 и 127 В, светильники, согласно правилам, должны быть подвешены на высоте не менее 2,5 м от пола или настила. При этом особое внимание должно быть обращено на состояние изоляции проводов временной проводки, целостность изолирующей оболочки патронов и т. п.

20.4 Нормы освещенности и упрощенные способы расчета осветительных установок

В условиях строительства в ряде случаев, при отсутствии проекта электрического освещения, может встретиться необходимость определения количества и мощности осветительных приборов - прожекторов или светильников. Это необходимо для создания на территории строительства или в каком-либо помещении требуемой нормами освещенности. Для этих целей наиболее удобен простой метод расчета, который носит название *метода удельной мощности*.

Рассмотрим порядок расчета по этому методу. Данные по нормам освещенности, которыми следует руководствоваться при расчете, приведены в таблице 20.1.

Наружное прожекторное освещение. Число прожекторов, необходимое для освещения заданной площади, по методу удельной мощности определяется по формуле:

$$N = \omega E S / P_{\text{л}} \quad (20.1)$$

где ω - удельная мощность ламп прожекторов, приходящаяся на 1 м² освещаемой площади и 1 лк освещенности (ее следует принимать: для прожекторов ПЗС-35 равной 0,25–0,4 Вт/(м²лк), а для прожекторов ПЗС-45 равной 0,2–0,3 Вт/(м²лк));

E - освещенность, лк (см. табл. 19.1);

S - площадь, подлежащая освещению, м²;

$P_{\text{л}}$ - мощность лампы прожектора, Вт.

Пример 1. Необходимо осветить прожекторами строительную площадку размером 205 х 100 м. По данным табл. 20.1 следует принять освещенность (E) площадки на уровне земли равной 2 лк.

Тип прожекторов примем ПЗС-35 с лампой 500 Вт. Находим освещаемую площадь:

$$S = 205 \times 100 = 20500 \text{ м}^2.$$

Удельную мощность прожекторов (ω) принимаем равной 0,30 Вт/(м²·лк). Определяем число прожекторов по формуле (19.1): $n = 24,6$ шт.

Следует установить 24 прожектора на шести мачтах высотой порядка 13 м, разместив мачты по контуру площадки.

Внутреннее освещение. Расчет общего освещения внутри производственных, административно-управленческих и других зданий, а также в помещениях строящихся зданий выполняют аналогично, методом удельной мощности. Данные, необходимые для проведения простейших расче-

тов, приведены в таблице 20.2.

Таблица 20.2 – Удельная мощность общего равномерного освещения светильником «Универсаль» без затенителя с лампами накаливания

Расчетная высота, м	Площадь помещения, м ²	Удельная мощность ω' (Вт/м ²) при минимальной освещенности (лк), равной					
		20	30	50	75	100	150
2–3	25–50	6,4	8,6	13,8	19,5	24,5	35
	50–150	5,3	7,2	11,4	16,3	21	29
	150–300	4,7	6,4	10,2	14,3	18,5	26
3–4	30–50	6,4	8,9	14,5	20,5	25	35
	50–120	5,5	7,6	12	17	21,5	29,5
	120–300	4,7	6,6	10,2	14	18	25

Приведем ход расчета с использованием этих таблиц. Определяют по таблице 20.1 величину освещенности, соответствующую заданным условиям. Выбирают для данного помещения тип светильника, намечают (в соответствии с размерами помещения) расчетную высоту подвеса светильников. Затем по таблице 20.2 находят для данного типа светильника, расчетной высоты подвеса, площади помещений и требуемой освещенности величину удельной мощности в Вт/м². Расчетной высотой подвеса (обозначается h_p) называется высота подвеса светильника над освещаемой рабочей поверхностью (станка, верстака, стола).

Умножая найденное значение удельной мощности на площадь помещения, вычисляют общую мощность ламп светильников, необходимую для данного помещения:

$$P_{\text{общ}} = \omega' \cdot S, \quad (20.2)$$

где ω' - удельная мощность ламп светильников, Вт/м²;

S - площадь помещения, м².

Затем, зная стандартные мощности ламп, пригодные для данного светильника, выбирают количество светильников и мощность ламп.

Пример 2. Необходимо осветить монтажную мастерскую площадью 190 м². Высота подвеса светильников над полом не должна быть ниже 3,5 м.

Для освещения выберем лампы накаливания. Принимаем для освещения мастерской светильник "Универсаль" с высотой подвеса над полом 3,5 м. Принимая высоту освещаемых поверхностей (верстаков) над полом в 0,8 м, находим расчетную высоту подвеса светильника h_p , равную $3,5 - 0,8 = 2,7$ м.

По таблице 20.1 находим для мастерской минимальную освещенность - 50 лк (меньшая норма для группы «точная работа»).

По таблице 20.2 находим для данных условий величину удельной мощности - 10,2 Вт/м². Общая мощность ламп для освещения мастерской определяется по формуле (20.2):

$$P_{\text{общ}} = 10,2 \cdot 190 = 1938 \approx 2000 \text{ Вт.}$$

Следует установить 10 светильников с лампами 200 Вт (2 ряда по 5 светильников).

Выводы

1. Электроосветительные установки являются важным элементом оборудования строительных площадок и предприятий стройиндустрии, обеспечивающим необходимые нормы освещенности рабочих мест.

2. На практике применяют общее, местное и комбинированное освещение рабочих мест.

3. Кроме обычного, рабочего, освещения, устраивается аварийное освещение, обеспечивающее минимальную освещенность. Для аварийного освещения устраивается отдельное питание.

4. В качестве источников света применяют лампы накаливания и газоразрядные лампы.

5. Газоразрядные лампы по сравнению с лампами накаливания отличаются меньшим потреблением электрической энергии.

Вопросы для самопроверки

1. В каких единицах измеряют силу света, световой поток и освещенность?

2. Какие виды освещения рабочих мест применяют в условиях строительства?

3. Какие источники света применяют на стройках и предприятиях стройиндустрии?

4. В чем состоят особенности люминесцентных ламп?

5. Поясните, что представляет собой осветительная арматура? Для чего она предназначена?

6. Какие виды светильников применяют на практике?

7. В каких случаях для освещения применяют прожекторы? Охарактеризуйте особенности их установки.

8. Объясните, как освещают дороги, не попадающие в зону, освещенную прожекторами?

9. Объясните, как устраивают местное освещение рабочих зон.

10. Охарактеризуйте требования техники безопасности к временному освещению зданий.

11. В чем состоит и в каких случаях используется метод расчета освещенности, который называется методом удельной мощности?

21 ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ

Ключевые понятия: система кондиционирования воздуха, сплит-система, лифт, электроконвектор.

21.1 Общие сведения

Современные жилые, общественные и промышленные здания характеризуются насыщенными инженерными системами, обеспечивающими эффективное управление эксплуатацией зданий. Значительную роль в них выполняют электроустановки: кондиционирования и вентиляции воздуха, отопления зданий, увлажнители и очистители воздуха, лифтовые и подъемные установки, установки электрического отопления и др.

Все большее распространение получают высотные здания и торгово-развлекательные комплексы, представляющие собой сложную конструктивную систему с большим количеством инженерных коммуникаций, с размещением на одном объекте различных систем инженерно-технического жизнеобеспечения повышенной сложности. Многие высотные здания многофункциональны и содержат либо один основной функциональный элемент (жилой, административно-офисный, гостиничный), либо два основных функциональных элемента (офисный и жилой, офисный и гостиничный, жилой и гостиничный). Кроме этого, в высотных зданиях имеются вспомогательные функциональные элементы, предназначенные для обслуживания находящихся в них людей, такие как автостоянки, технические помещения, бассейны, тренажерные залы, залы для игры в боулинг, бани-сауны, амбулаторные и медицинские кабинеты и т. д. Также в высотных зданиях могут располагаться объекты общегородского назначения: магазины, рестораны, кафе, буфеты, финансовые и банковские учреждения, различные офисы и др.

Основными компонентами инженерных систем зданий являются: электро-, тепло- и водоснабжение, водоподготовка, канализация, вентиляция, климатическое оборудование, кондиционирование, электрообогрев, охранно-пожарные системы, очистка стоков, ионизаторы и очистители воздуха, освещение и некоторые другие.

Важную роль в инженерных системах зданий играет **силовое электрооборудование**, в состав которого входят *электродвигатели и пускорегулирующая аппаратура технологического, санитарно-технического, противопожарного оборудования, подъемно-транспортных установок, уборочных механизмов*, а также силовые электроприемники теплового, лабораторного, лечебного оборудования и других аналогичных аппаратов и приборов электросети со всем комплексом проводников, распределительных устройств и электромонтажных изделий.

В последние годы показали свою эффективность специализированные организации, осуществляющие монтаж, обслуживание и ремонт технологического оборудования инженерных систем зданий (установок кондиционирования воздуха, лифтов, противопожарных установок и др.), что часто бывает целесообразно как по техническим, так и по экономическим соображениям. Наряду с этим в крупных общественных зданиях организуются инженерные службы, работники которых осуществляют эксплуатацию и обслуживание этих электротехнических установок.

Ниже рассмотрены некоторые группы электрооборудования инженерных систем зданий.

21.2 Системы вентиляции и кондиционирования

Задача систем кондиционирования и вентиляции воздуха - создание, регулирование и автоматическое поддержание комфортного микроклимата в закрытых помещениях: температуры, влажности, чистоты, скорости движения воздуха и т. д.

Кондиционирование осуществляется комплексом технических средств, называемых системой кондиционирования воздуха (СКВ). В состав СКВ входят технические средства забора воздуха, подготовки его параметров (фильтры, теплообменники, увлажнители или осушители), перемещения (вентиляторы) и распределения, а также средства автоматики, дистанционного управления и контроля. СКВ больших общественных, административных и производственных зданий обслуживаются, как правило, комплексными автоматизированными системами управления.

Центральные СКВ. Центральные СКВ применяются для многоэтажных, функциональных зданий, помещения в которых объединены едиными задачами (поликлиники, офисные строения, производственные помещения, архивы, склады и т. д.). Такие системы снабжаются теплом, доставляемым горячей водой, паром или электричеством, или холодом, доставляемым холодной водой или хладагентом, и электричеством для обеспечения работы вентиляторов, насосов и т. д. Центральные СКВ позволяют эффективно поддерживать заданную температуру и относительную влажность воздуха. Они обеспечивают эффективное шумо- и виброгашение, что важно в помещениях с повышенными требованиями к акустике (радио- и телестудии, студии записи и т. д.).

Локальные СКВ. Локальные СКВ обычно основаны на автономных и неавтономных кондиционерах, устанавливаемых непосредственно в обслуживаемых помещениях. В числе достоинств таких систем - простота установки и монтажа, возможность установки в уже построенных жилых и административных зданиях, в отдельных комнатах строящихся зданий, например, если режим потребления холода/тепла в них резко отличается от большинства других помещений. Кроме улучшения параметров (рецерку-

ляции) уже имеющего в помещении воздуха, также существуют сплит-системы, обеспечивающие забор и подачу очищенного воздуха снаружи. На рисунке 21.1 показан пример конструкции кондиционера в котором асинхронный электродвигатель М1 используется для привода вентилятора, подающего приточный воздух в охладитель, а асинхронный электродвигатель М2 - для привода насоса циркуляции хладагента.

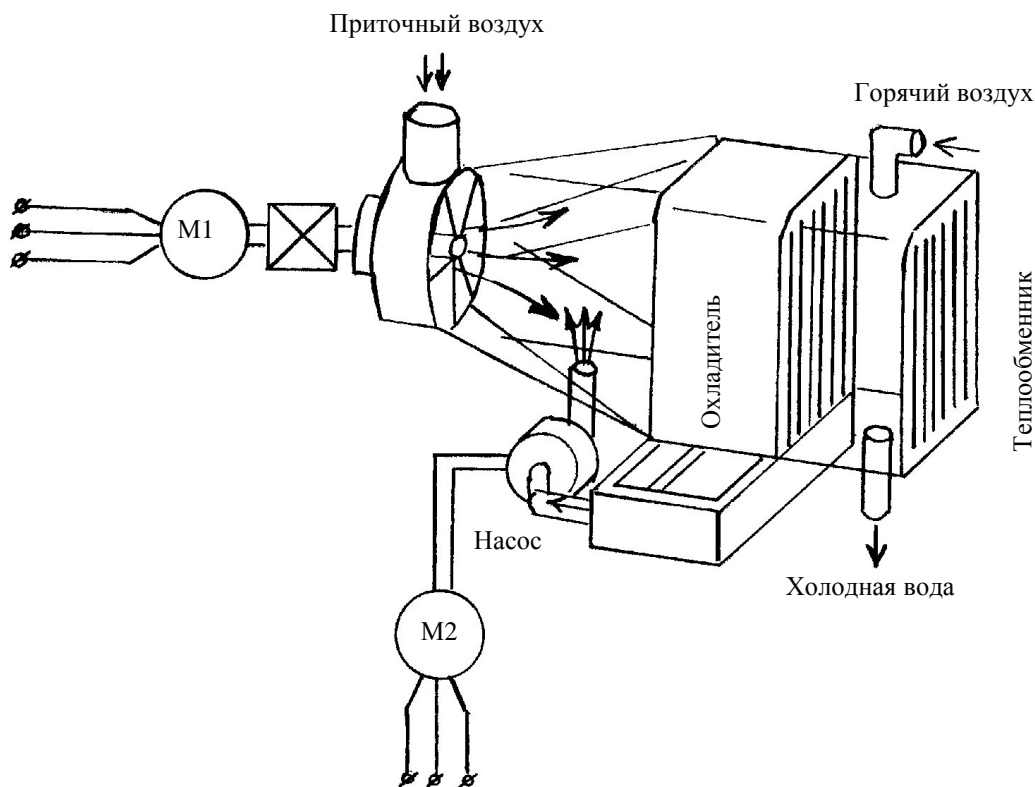


Рисунок 21.1 – Элементы конструкции кондиционера

21.3 Лифты и эскалаторы

Лифт представляет собой стационарную подъемно-транспортную машину периодического действия, предназначенную для подъема и спуска людей и грузов. Перевозка пассажиров осуществляется отдельными партиями через определенное время, при этом движение чередуется с остановками для посадки и высадки людей. Лифт является наиболее распространенным подъемником периодического действия.

К пассажирским подъемно-транспортным машинам относятся и фуникулеры. Эти машины используют обычно на крутых подъемах. Так в г. Ялта фуникулер используется для подъема на гору Ай-Петри, в Киеве – для подъема на Владимирскую горку.

К подъемно-транспортным машинам непрерывного действия относятся также эскалаторы. Посадка и высадка пассажиров с таких машин происходит без остановки последних в процессе работы. При значительных и интенсивных пассажиропотоках, характерных для большинства общест-

венных зданий, в метрополитенах, портах, вокзалах и универмагах наибольшее распространение получили эскалаторы.

Вместе с тем, там, где пассажиропоток сравнительно небольшой и непостоянный (жилые дома, административные здания), устанавливают лифты. По назначению лифты могут быть пассажирские, грузовые, грузопассажирские, больничные и специальные. По скорости лифты подразделяются на тихоходные – до 1 м/с, быстроходные – от 1 до 2,5 м/с и скоростные – от 2,5 м/с до 9,2 м/с.

Упрощенно пассажирский лифт с электроприводом представляет собой кабину, подвешенную на стальных канатах в вертикальной шахте. Установленная в машинном помещении лебедка наматывает канаты на барабан. Кабина движется по направляющим, укрепленным на стенах шахты. Современные лифты – это довольно сложные системы с грузоподъемностью от 50 кГ (100, 150 и 250 кГ – малогрузовые) до 5000 кГ. Они оснащаются сложными системами автоматических устройств, предотвращающими аварийные ситуации.

В деловых центрах, банках и других общественных зданиях сложилась практика устанавливать лифты, позволяющие обслуживать большие пассажиропотоки в периоды прихода и ухода сотрудников. При этом совсем не обязательно увеличивать количество лифтов или их грузоподъемность. Сегодня подобные задачи могут быть решены также с помощью специального программного обеспечения, которым оснащены некоторые модели лифтов ведущих производителей. Так, существуют специальные программы для сокращения времени ожидания прихода лифта.

Торговые и выставочные комплексы достаточно часто оснащаются панорамными лифтами. Панорамный лифт, предназначенный для обозрения, может иметь различную конфигурацию. А для создания максимального обзора часто применяют стеклянные панели от пола до потолка.

Конкуренция на лифтовом рынке заставляет предприятия постоянно повышать качество своей продукции. Этому способствует модернизация производства, установка современного высокотехнологичного оборудования, разработка новых конструкций лифтов. Расширение номенклатуры предприятий-изготовителей обеспечивает заказчикам большой выбор лифтового оборудования. Так, наряду с типовыми и серийными проектами заводы изготавливают лифты по индивидуальным заказам. Например, в связи с вводом в действие новых строительных норм многие производители выпускают лифты для перевозки пожарных подразделений. К тому же системы управления лифтами могут быть выполнены на различной элементной базе, что обеспечивает необходимый режим работы лифта в зависимости от типа здания, в котором он установлен.

21.3.1 Электрооборудование лифтов по составу и назначению аналогично электрооборудованию подъемно-транспортных машин (подразде-

ле 17.3). Напряжение от источника питания подается в машинное помещение лифта через вводное устройство, которое должно отключать питание приводного электродвигателя, цепей управления, сигнализации и освещения кабины лифта. Для питания цепей сигнализации и ремонтного освещения используются понижающие трансформаторы напряжения с номинальными напряжениями первичных обмоток 220 и 380 В, вторичных обмоток – 24 и 36 В. Мощности понижающих трансформаторов 250–1500 ВА.

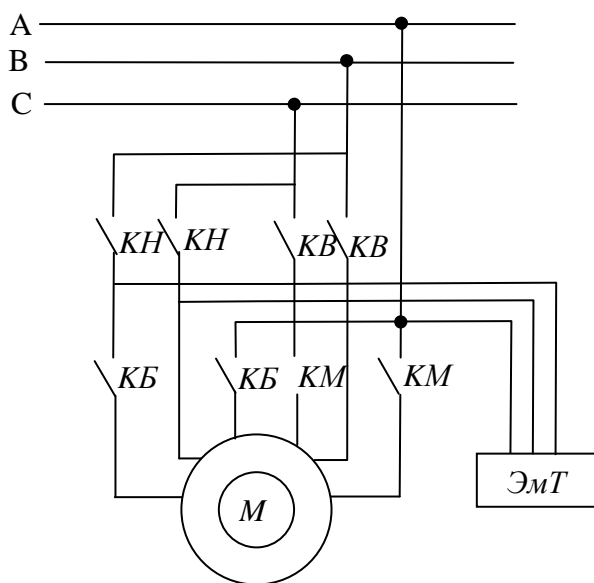


Рисунок 21.2 – Силовые цепи грузового лифта

Для защиты электродвигателей от перегрузок и коротких замыканий используют автоматические выключатели с тепловыми и электромагнитными расцепителями.

Для включения силовых цепей электродвигателей и тормозных электромагнитов применяются контакторы постоянного и переменного тока.

На рисунке 21.2 в качестве примера показан фрагмент схемы силовых цепей грузового лифта. На схеме показаны: *М* – двухскоростной АД, *ЭмТ* – электромагнитный тормоз, *КН* –

силовые контакты контактора «вниз», *КВ* – силовые контакты контактора «вверх», *КБ* – силовые контакты контактора «большая скорость», *КМ* – силовые контакты контактора «малая скорость».

21.4 Элементы систем водоснабжения

К электрооборудованию систем водоснабжения относятся электродвигатели хозяйственных насосов, насосов систем горячего водоснабжения и сетей противопожарного водопровода. В большинстве случаев в сетях водоснабжения устанавливается два насоса (иногда три или четыре) с асинхронными электродвигателями: один рабочий, второй – резервный. Режим работы электродвигателя определяется назначением насосов. Так в системах горячего водоснабжения температура и давление воды поддерживаются автоматически с помощью датчиков, обеспечивающих автоматическое включение насосов. В зависимости от условий окружающей среды режим работы электродвигателей может быть длительным или повторно-кратковременным. Электродвигатели противопожарных систем включаются в аварийных ситуациях и работают до ликвидации пожара (длительный режим).

На рисунке 21.3 в качестве примера приведена схема управления двумя хозяйственными насосами, которые устанавливаются в центральных тепловых пунктах и обслуживают группу жилых домов и других зданий микрорайона. Насосы включаются поочередно, благодаря чему обеспечивается равномерный износ агрегатов. Схема работает следующим образом.

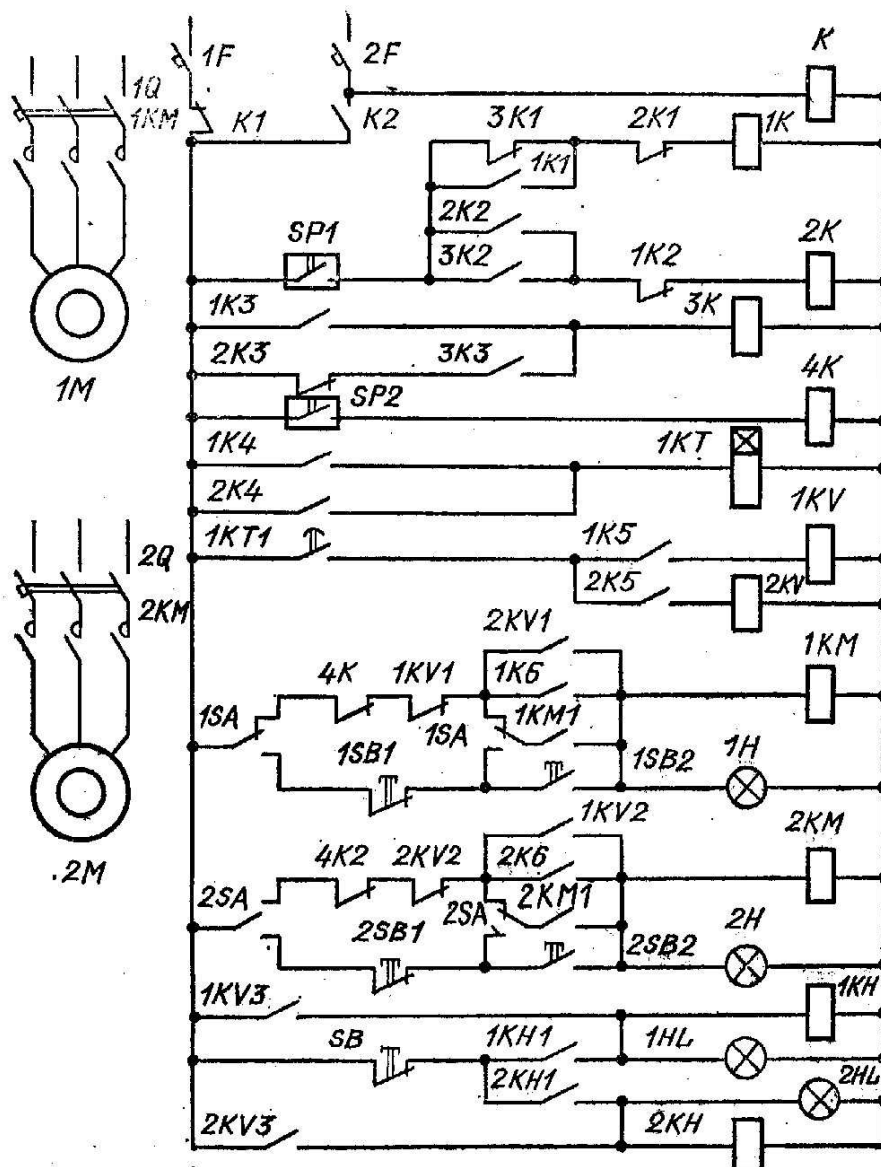


Рисунок 21.3 – Схема управления насосами водоподкачки

При замыкании контакта минимального давления *SP1* срабатывает реле *1K*, которое замыкает свои контакты *1K6* и подает напряжение на катушку пускателя *1KM*. Последний включает в работу насос. Одновременно реле *1K* контактом *1K3* подает напряжение на катушку реле *3K*, которое самоблокируется и подготавливает цепь реле *2K*. При повторном замыкании контакта *SP1* срабатывает реле *2K*, которое теперь включает в работу второй насос и обесточивает реле *3K*. Таким образом, при каждом замыкании контакта *SP1* поочередно срабатывают реле *K1* и *K2*, и, как следствие, поочередно включаются электродвигатель первого насоса *M1* и второго

насоса *M2*. Отключение работающего насоса осуществляется с помощью реле *4K*, которое срабатывает при замыкании контакта максимального давления *SP2*.

Если работающий насос не поднимает давление в сети, то контакт *SP1* не размыкается, и тогда с небольшой выдержкой времени, обеспечиваемой реле *1KT*, срабатывает либо реле *1KV*, либо реле *2KV*, которое отключает неисправный насос и включает резервный.

Работа насосов сигнализируется зелеными лампами *1H* и *2H*, а авария насосов – красными лампами *1HL* и *2HL*.

Реле *K* служит для автоматического переключения питания цепей управления при исчезновении напряжения в силовых цепях одного из электродвигателей.

Для производства наладочных и ремонтных работ предусмотрено управление насосами местными кнопками *1SB1*, *2SB2*. Перевод на местное управление осуществляется с помощью переключателей *1SA* и *2SA*.

21.5 Электрическое отопление

Достаточно длительное время электрическое отопление считалось дорогим, пожароопасным и экологически вредным. Прогресс в области производства конвекторов и термостатов, появление новых типов электроотопительных приборов, а именно кабельного обогрева полов и инфракрасных потолочных обогревателей, в корне изменили эксплуатационные характеристики современного электроотопления. Оборудование, предназначенное для жилых помещений, является экологически чистым (температура нагревательных элементов незначительна и они не изменяют влажность), пожаробезопасным, имеет соответствующий класс защиты от поражения электрическим током, работает бесшумно и не выделяет никаких вредных веществ. Электромагнитное поле у этих приборов находится на фоновом уровне. В целом современные системы электроотопления зданий соответствуют самым жестким требованиям по экологии и безопасности.

Широчайшие возможности появились и для экономичного и рационального использования электроэнергии для отопления.

В каждое отапливаемое помещение устанавливается термостат, позволяющий регулировать температуру в широком диапазоне (5–30°C). Следует заметить, что снижение температуры на 1°C уменьшает затраты электроэнергии на 4–5%. При гибкой смене температурных режимов в каждом отдельном помещении экономия может достигать 30–50%. Особенно существенная экономия (до 80%) достигается для высоких (выше 4,5 м) объектов при использовании инфракрасных обогревателей или «теплого пола». Имеется возможность запрограммировать любой график изменения температур, можно отключить любую комнату, группу комнат или целый

этаж. После временного отключения электропитания отопление начинает работать без вмешательства человека.

В жилых домах электроотопление очень удобно как дополнение к уже существующей системе центрального отопления. Это существенно при похолодании в весенне-осенний период, когда центральное отопление отключено. В критические периоды зимой при значительном похолодании, когда центральная система не обеспечивает требуемый уровень комфорта, прямое стационарное электрическое отопление автоматически обеспечивает требуемый температурный режим, при этом эксплуатационные затраты незначительны. Трудно оценить значение дополнительного резервного электроотопления при авариях и других нештатных ситуациях.

Особые проблемы с отоплением возникают в помещениях с высокими потолками (5–10 м) и неудовлетворительной теплоизоляцией. Это заводские корпуса, склады, автобазы, крытые спортивные и концертные залы, выставочные и торговые павильоны и т. п. Для таких сооружений самыми эффективными отопительными приборами считаются инфракрасные обогреватели, экономия электроэнергии здесь может достигать 80%.

Современные отопительные системы проектируются и монтируются с использованием **электроконвекторов**. Название «конвектор» отражает принцип распределения горячего воздуха в помещении – естественную конвекцию. Нагрев воздуха происходит при прохождении его через нагревательный элемент. Холодный воздух проходит через нагревательный элемент, нагревается и выходит через жалюзи, а его место занимает воздух из помещения. Таким образом, теплый воздух циркулирует в помещении, быстро обеспечивая комфортное тепло. Конвектор нагревает помещения, не используя устройств для принудительной циркуляции воздуха, что делает его более надежным и экономичным прибором по сравнению с обогревателями со встроенным вентилятором. При этом в отличие от тепловентиляторов, конвекторы, создавая эффективное движение теплого воздуха, абсолютно не создают шума.

Температуру воздуха в помещении контролирует встроенный термостат с датчиком. Пользователь выставляет необходимую температуру на термостате, а датчик воздуха измеряет температуру поступающего воздуха и при достижении заданных параметров выключает нагрев. При уменьшении температуры в помещении вновь включается нагрев. Таким образом, конвектор поддерживает постоянную заданную температуру. Точность поддержания температуры в помещении для некоторых моделей конвекторов достигает 0,1°C. В отличие от конвекторов, у масляных радиаторов термостат контролирует не температуру воздуха, а температуру масла. Поэтому точность поддержания температуры у них гораздо меньше и составляет примерно 3–5°C.

Современные конвекторы (APPLIMO, SOLO, EURO PLUS и др.), благодаря применению новейших и уникальных технологий, имеют следующие **преимущества** по сравнению с традиционными обогревателями (маслонаполненными радиаторами, тепловентиляторами) и другими конвекторами.

КПД нагревательных элементов достигает 95–99%.

Полное отсутствие шума при нагреве и остывании нагревательного элемента. Масляный радиатор при работе издает характерные щелчки («бульканье»), которые происходят при нагреве и остывании масла внутри прибора.

Эффективный нагрев воздуха, не нарушающий его естественной влажности и не сжигающий кислород.

Большой ресурс непрерывной работы (у некоторых моделей до 25 лет).

Высокая скорость выхода на рабочую температуру (1–1,5 мин). У масляных радиаторов – до 15 мин.

Расход электрической энергии зависит от теплотерь отапливаемого помещения. По среднестатистическим данным [61] при наружной температуре -20°C и температуре в помещении $+18^{\circ}\text{C}$ для отопления 1 м^3 помещения необходимо 40–45 Вт электрической энергии, что составляет 120 Вт установленной мощности на 1 м^2 при высоте потолков 250–270 см.

Выводы

1. Основными компонентами инженерных систем зданий являются: электро-, тепло- и водоснабжение, водоподготовка, канализация, вентиляция, климатическое оборудование, кондиционирование, электрообогрев, охранно-пожарные системы, очистка стоков, ионизаторы и очистители воздуха, освещение и некоторые другие.

2. Основными элементами сложных систем жизнеобеспечения современных высотных жилых зданий и торгово-развлекательных комплексов является электрооборудование различного назначения.

3. В приводе систем вентиляции, кондиционирования, лифтов и подъемников, систем водоснабжения применяются электродвигатели.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите основные компоненты инженерных систем зданий.
2. Какие элементы составляют силовое электрооборудование инженерных систем зданий?
3. Какие элементы входят в состав системы кондиционирования воздуха?
4. Назовите основные элементы электрооборудования лифтов.
5. Как выполняется питание цепей сигнализации и ремонтного освещения лифтовых установок?
6. Объясните работу схемы управления насосами водоподкачки.
7. Поясните, в чем состоят преимущества современных систем электроотопления зданий?
8. Охарактеризуйте преимущества и недостатки использования электроэнергии для отопления зданий.

22 ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Ключевые понятия: электробезопасность, электрический удар, электрический ожог, электрический знак, металлизация кожи, электроофтальмия, наряд, распоряжение, защитные средства, защитное заземление, зануление.

22.1 Общие сведения

В общем случае под *электробезопасностью* понимают *систему организационных и технических мероприятий и средств, направленных на защиту людей от опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества*. В рамках данного учебника речь идет о защите персонала, работающего с электрифицированным инструментом, на электротехнологических установках и оборудовании предприятий строительной индустрии и строительных площадок. Необходимость решения этой задачи вызвана тем, что в случае попадания под напряжение, через тело человека проходит электрический ток, от величины которого зависит степень поражения.

Важность данного вопроса обусловлена тем, что современных условиях производительность труда в строительстве, как и в других областях человеческой деятельности, в значительной степени определяется электровооруженностью труда. При постоянном ее росте все больше внимания приходится уделять вопросам электробезопасности.

Для решения этой задачи проводят организационные мероприятия и применяют отдельно или в сочетании друг с другом различные технические способы и средства: защитное заземление, зануление, выравнивание потенциалов, изоляцию токоведущих частей, предупреждающую сигнализацию, блокировки, знаки безопасности, средства защиты и др.

Система требований и правил изложена в «ГОСТ 12.1.013-78 ССБТ. Строительство. Электробезопасность. Общие сведения».

22.2 Действие электрического тока на организм человека

Электрический ток, действующий на организм человека, может привести к таким видам поражений как электрический удар, ожог, металлизация кожи, электрический знак, механическое повреждение, электроофтальмия. При прохождении электрического тока через организм человека в первую очередь поражается центральная нервная система, в результате чего нарушается работа сердечной мышцы и органов дыхания. Степень поражения зависит от силы и частоты тока, а также от пути прохождения тока через организм человека (см. табл. 22.1). Правилами техники безопасности за безусловно опасную принята сила тока 50 мА.

Таблица 22.1 – Степень воздействия электрического тока на человека

Сила тока, мА	Переменный ток частотой 50–60 Гц	Постоянный ток
0,6–1,5	Начало ощущения – слабый зуд, пощипывание кожи	Не ощущается
2–3	Ощущение тока распространяется на запястье руки, слегка сводит руку	Не ощущается
5–7	Болевые ощущения, судороги в руках	Зуд. Ощущение нагревания
8–10	Руки с трудом отрываются от электродов. Сильные боли в руках и судороги.	Усиление нагревания
20–25	Руки мгновенно парализуются, оторвать их от электродов невозможно. Очень сильные боли в руках и груди. Затрудняется дыхание.	Еще большее усиление нагревания, незначительное сокращение мышц рук.
50–80	Дыхание парализуется. Начало трепетания желудочков сердца.	Сильное ощущение нагревания. Сокращение мышц рук. Судороги. Затруднение дыхания.
90–100	Паралич дыхания и фибрилляция через 1–3 с.	Паралич дыхания.

Электрический удар приводит к возбуждению живых тканей. Различают несколько степеней тяжести электротравм при электрическом ударе:

- 1) электротравма I степени – судорожное сокращение мышц без потери сознания;
- 2) электротравма II степени – судорожное сокращение мышц с потерей сознания;
- 3) электротравма III степени – потеря сознания и нарушение функций сердечной деятельности или дыхания (не исключено то и другое);
- 4) электротравма IV степени – клиническая смерть.

Степень тяжести электрического поражения зависит от многих факторов: сопротивления организма, величины, продолжительности действия, рода и частоты тока, пути его в организме, условий внешней среды. Исход воздействия электрического тока зависит и от физического состояния человека. Если он болен, утомлен или находится в состоянии опьянения, душевной подавленности, то действие тока особенно опасно. Безопасными для человека считаются переменный ток до 10 мА и постоянный – до 50 мА.

Электрический ожог является последствием коротких замыканий в электроустановках и пребывания частей тела человека (как правило, рук) в

сфере светового (ультрафиолетового) и теплового (инфракрасного) излучения электрической дуги. Приводит к ожогам III и IV степени с тяжелым исходом – при соприкосновении человека, непосредственно или через электрическую дугу, с токоведущими частями напряжением свыше 1000 В.

Электрический знак – это специфическое поражение, вызываемое механическим, химическим или их совместным воздействием тока. Пораженный участок кожи практически безболезнен, вокруг него отсутствуют воспалительные процессы. Со временем он затвердевает, и поверхностные ткани отмирают. Электроразряды обычно быстро излечиваются.

Металлизация кожи – это пропитывание кожи мельчайшими паровыми или расплавленными частицами металла под влиянием механического или химического воздействия тока. Пораженный участок кожи приобретает жесткую поверхность и своеобразную окраску. В большинстве случаев металлизация излечивается, не оставляя на коже следов.

Поражение глаз ультрафиолетовыми лучами, источником которых является электрическая дуга, называется **электроофтальмией**. В результате электроофтальмии через несколько часов возникает воспалительный процесс.

В соответствии с законом Ома величина тока определяется напряжением и сопротивлением цепи. Значительным электрическим сопротивлением обладает только поверхностный слой кожи человека. Это сопротивление зависит от многих причин (влажности кожи, степени расширения кожных капилляров и др.) и колеблется в широких пределах – от 800 до 100000 Ом. Сопротивление резко снижается, например, при употреблении алкоголя. Если принять сопротивление тела человека равным 1000 Ом, то опасным будет ток при напряжении $U = I \cdot R_{\text{тел}} = 0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ В}$, при этом источник должен отдавать мощность $P = U \cdot I = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Вт}$.

Если мощность источника значительно меньше указанной цифры, то высокие напряжения не приводят к общему поражению организма человека, но вызывают неприятные ощущения.

При неисправности изоляции электротехнических установок неизолированные металлические конструкции могут оказаться под напряжением. Если человек коснется такой металлической конструкции, он оказывается под напряжением, которое называется **напряжением прикосновения** $U_{\text{пр}}$.

В соответствии с [40, 41], опасными для человека считаются следующие напряжения прикосновения: в сухом помещении $U_{\text{пр}} = 65 \text{ В}$, в сырых помещениях с относительной влажностью 75% и токопроводящими полами $U_{\text{пр}} = 36 \text{ В}$, в особо опасных помещениях (металлические кабины, котлы, помещения с относительной влажностью 100%) $U_{\text{пр}} = 12 \text{ В}$.

22.3 Классификация условий работы по степени электробезопасности

Работы, производимые в действующих электроустановках, в отношении мер безопасности подразделяются на следующие категории:

- при полном снятии напряжения;
- с частичным снятием напряжения;
- без снятия напряжения вблизи и на токоведущих частях;
- без снятия напряжения вдали от токоведущих частей, находящихся под напряжением.

По степени электробезопасности различают следующие условия работы.

Особо опасные условия поражения людей электрическим током:

- наличие сырости (дождь, снег, частое опрыскивание и покрытие влажной потолка, стен, предметов, находящихся внутри помещений);
- наличие химически активной среды;
- наличие одновременно двух или более условий повышенной опасности.

Условия с повышенной опасностью поражения людей электрическим током:

- наличие влажности (пары или конденсирующаяся влага, выделяющаяся в виде мелких капель, и относительной влажности более 75%);
- наличие проводящей пыли (технологическая или другая пыль, осевшая на проводах, проникая внутрь машин и аппаратов и отлагаясь на электроустановках, ухудшают условия охлаждения изоляции, но не вызывает опасности пожара или взрыва;
- наличие токопроводящих оснований (металлических, земляных, железобетонных, кирпичных);
- наличие повышенной температуры независимо от времени года и различных тепловых излучений (температура превышает 35°C или кратковременно – 40°C);
- наличие возможностей одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам с одной стороны и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

Условия без повышенной опасности поражения людей электрическим током – отсутствие условий, создающих повышенную или особую опасность.

22.4 Мероприятия по обеспечению безопасного ведения работ с электроустановками

22.4.1 Организационные мероприятия. Работа в электроустановках производится по наряду, распоряжению или в порядке текущей эксплуатации.

Наряд – письменное задание, изложенное на бланке установленной формы, определяющее место, время начала и окончания работ, условия безопасного ведения работ, состав бригады и лиц, ответственных за безопасность работ. По наряду должны выполняться работы с полным снятием напряжения, с частичным снятием напряжения, без снятия напряжения вблизи и на токоведущих частях, находящихся под напряжением.

Распоряжение – задание на проведение работ в электроустановках, записанное в оперативном журнале. Распоряжение имеет разовый характер, выдается на одну работу и действует на одну смену или в течение часа, в зависимости от характера работы. По распоряжению могут производиться работы без снятия напряжения вдали от токоведущих частей, находящихся под напряжением, продолжительностью не более одной смены, внеплановые кратковременные и небольшие по объему работы, продолжительностью до 1 часа, вызванные производственной необходимостью, с полным или частичным снятием напряжения, а также без снятия напряжения вблизи и на токоведущих частях, находящихся под напряжением. А также некоторые виды работ с полным или частичным снятием напряжения в электроустановках напряжением до 1000 В продолжительностью не более одной смены.

К работам, выполняемым по распоряжению, без снятия напряжения вдали от токоведущих частей, относятся уборка коридоров и служебных помещений открытых и закрытых РУ, ремонт осветительной аппаратуры, замена ламп вне камер и ячеек, при снятии напряжения с участка осветительной сети, на котором производятся работы, уход за щетками, кольцами и коллекторами электрических машин, возобновление надписей на кожухах и др.

К работам, выполняемым по распоряжению в случае производственной необходимости, без снятия напряжения вблизи и на токоведущих частях, находящихся под напряжением, относятся работы на кожухах электрооборудования, измерения токоизмерительными клещами, смена предохранителей в цепях до 1000 В, проверка нагрева контактов штангой, определение вибрации шин штангой, фазировка, контроль изоляции штангой. Эти работы выполняются кратковременно (до 1 часа) и не менее чем двумя работающими.

К работам в электроустановках до 1000 В с полным или частичным снятием напряжения, выполняемым по распоряжению, относятся ремонт магнитных пускателей, пусковых кнопок, автоматических выключателей,

рубильников, реостатов, контакторов и аналогичной аппаратуры, установленной вне щитов и сборок, ремонт отдельных электроприемников (электродвигателей, электрокалориферов), ремонт отдельно расположенных магнитных станций и блоков управления, смена предохранителей, ремонт осветительной проводки. Работы должны выполняться двумя работающими.

В порядке текущей эксплуатации оперативным или оперативно-ремонтным персоналом производятся работы на закрепленном участке в течение одной смены по специальному перечню с последующей записью в оперативном журнале.

22.4.2 Технические мероприятия. *Ведение работ с частичным или полным снятием напряжения в установках до 1000 В.* Отключаются все силовые и другие трансформаторы со стороны высшего и низшего напряжения. Отключение может быть произведено коммутационным аппаратом с ручным управлением, контакты которого видны с лицевой стороны (если при этом контакты не видны, то необходимо открыть щитки, дверцы кожухов или снять сами кожухи), контакторами с автоматическим приводом и дистанционным управлением при снятии предохранителей оперативного тока отсоединением концов включающей катушки. При отсутствии переносного заземления принимают дополнительные меры - снимают предохранители, применяют изолированные накладки в рубильниках и автоматах, отключают концы питающих линий и т. д.

Проверка отсутствия напряжения должна производиться указателем напряжения. Отсутствие напряжения должно проверяться на всех фазах. Проверка производится в диэлектрических перчатках. Проверка отсутствия напряжения в сетях до 1000 В производится указателем напряжения или переносным вольтметром. Применение контрольных ламп допускается при линейном напряжении до 220 В.

Меры, обеспечивающие безопасность работ без снятия напряжения. Рабочее место электромонтера должно располагаться так, чтобы токоведущие части, находящиеся под напряжением, находились перед ним или с одной стороны. Необходимо пользоваться защитными средствами. Спецодежда работающих должна быть глухой и иметь опущенные и застегнутые рукава, головной убор надевать обязательно.

22.4.3 Защитные средства. *Защитными средствами* называются приборы, аппараты, переносные устройства, служащие для защиты персонала от поражения электрическим током. Минимальные нормы комплектов защитных средств электроустановок напряжением до 1000 В при вводе их в эксплуатацию следующие:

- указатель напряжения – один;
- изолирующие клещи – одни;
- диэлектрические перчатки, галоши – по две пары;

- монтерский инструмент с изолирующими ручками – не менее двух комплектов;
- переносные заземления – не менее двух;
- предупреждающие плакаты – не менее двух комплектов;
- диэлектрические коврики – два;
- временные ограждения – не менее двух комплектов;
- защитные очки – одна пара;
- противогаз – один.

22.5 Защитное заземление и зануление

Одним из наиболее важных мероприятий, значительно повышающих электробезопасность работающих на стройках людей, является правильное устройство защитного заземления.

Защитное заземление представляет собой соединение металлических частей электрооборудования и установок при помощи заземляющего проводника с заземлителем, обладающим малым сопротивлением соединения с землей. Оно обеспечивает безопасное напряжение прикосновения. Заземлитель и заземляющие проводники носят название заземляющего устройства. Защитное заземление используют при незаземленной нейтрали.

Зануление представляет собой соединение металлических частей, нормально не находящихся под напряжением, с многократно заземленным нулевым проводом. Зануление выполняется в системах с заземленной нейтралью и обеспечивает надежное отключение установки при замыкании на корпус.

Причиной поражения людей электрическим током может быть не только прикосновение к токоведущим частям. При повреждении изоляции корпуса электродвигателей или пусковой аппаратуры и, самое главное, связанные с ними металлические части строительных машин и механизмов оказываются под напряжением. Прикоснувшись к ним, человек при отсутствии защитных мер поражается электрическим током. Такие случаи особенно опасны тем, что рабочие, обслуживающие машины, не ожидая опасности, постоянно соприкасаются с ее металлическими частями. Защитой от поражения током при переходе напряжения на конструктивные металлические части служит защитное заземление.

Заземлению подлежат металлические части строительных машин и механизмов с электроприводом, корпуса электроинструментов, корпуса электрооборудования и пускорегулирующих аппаратов, конструкции, каркасы и кожухи электротехнических устройств и другие металлические части, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции.

Конструктивное выполнение защитного заземления зависит от напряжения и системы электроснабжения.

Сети напряжением до 1000 В (сети 380/220 В) на строительных площадках сооружаются по четырехпроводной системе – «звезда» с нулем. В таких сетях, согласно правилам, в обязательном порядке заземляется нейтраль (нулевая точка) силовых трансформаторов (система с глухозаземленной нейтралью). Для этого у каждого трансформаторного пункта (ТП) устраивают заземляющий контур, к которому подсоединяют вывод нулевой точки трансформатора, а следовательно, и нулевой провод сети. Сопротивление заземляющего устройства ТП, согласно правилам, должно не превышать 4 Ом (для трансформаторов мощностью до 100 кВА эта норма повышается до 10 Ом).

Нулевой провод воздушных линий повторно заземляют через каждые 250 м, а также на концах линий и ответвлений, в том числе обязательно в зоне работы строительных механизмов - башенных кранов, экскаваторов и т. д.

В сетях с глухозаземленной нейтралью защитное заземление выполняют присоединением заземляемых частей установки к заземленному нулевому проводу электросети (рис. 22.1). Действие такого заземления (оно также называется занулением) состоит в том, что в случае повреждения изоляции и появления напряжения на корпусе оборудования создается короткое замыкание в одной из фаз трансформатора через нулевой провод, в результате чего поврежденная часть установки автоматически отключается, так как под действием тока короткого замыкания немедленно перегорает плавкая вставка предохранителя или отключается автомат.

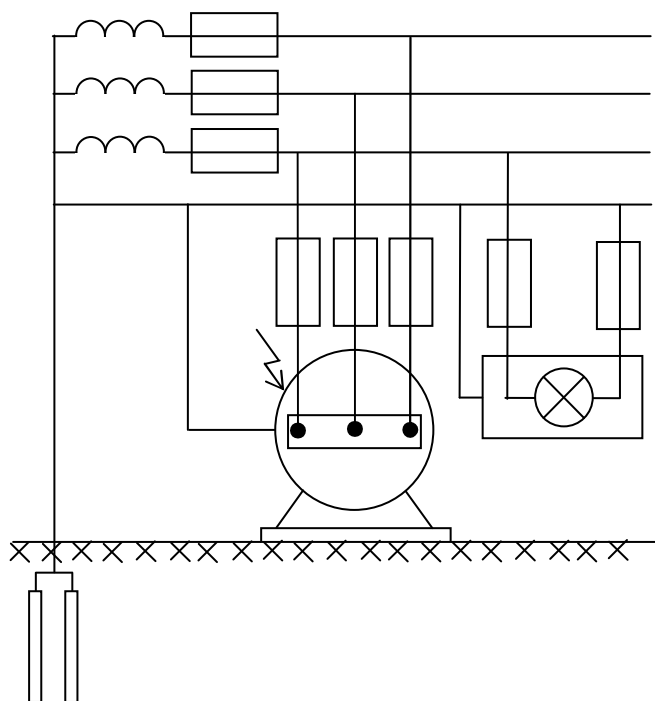


Рисунок 22.1 - Защитное заземление в четырехпроводной линии

оборудования крана, которое осуществляют посредством четвертой жилы шлангового кабеля, обязательно заземляют подкрановые рельсовые пути.

Заземление корпусов строительных машин осуществляется с помощью заземляющей жилы шлангового кабеля, питающего электропривод машины. Один конец заземляющей жилы присоединяется к заземляющему болту на корпусе (или металлоконструкциях) машины, а другой – к заземляющему болту на корпусе пускового ящика или подключательного пункта, через который подается питание к машине. Корпус пускового ящика присоединяется к нулевому проводу сети.

Некоторые особенности имеет заземление башенных кранов. Помимо заземления металлической конструкции и корпусов электро-

При этом перемычки между всеми стыками рельсов, а также между двумя нитками рельсов выполняются сваркой. Рельсы присоединяются отдельными проводниками к повторному заземлению нулевого провода и к заземляющему болту подключательного пункта крана.

В отдельных случаях в электроустановках строительных организаций могут применяться сети трехфазного тока напряжением до 1000 В (трехпроводные), работающие с изолированной нейтральной точкой силовых трансформаторов. Такого рода сети иногда строят на торфоразработках и в подземных выработках. В таких сетях, а также во всех электроустановках на напряжение выше 1000 В (например, у строительных машин с высоковольтным электроприводом), защитное заземление выполняют сооружением местного заземляющего устройства (отдельного заземляющего контура) с присоединением к нему заземляемых частей оборудования (рис. 22.2). Местное заземляющее устройство при этом должно иметь малое сопротивление. Согласно правилам сопротивление такого заземляющего устройства в установках на напряжение до 1000 В не должно превышать 4 Ом. В сетях напряжением 6–10 кВ это значение определяется расчетом, но не должно превышать 10 Ом. Действие заземления в этом случае состоит в том, что оно снижает до безопасной величины напряжение, которое может появиться на корпусе машины или аппарата при повреждении изоляции.

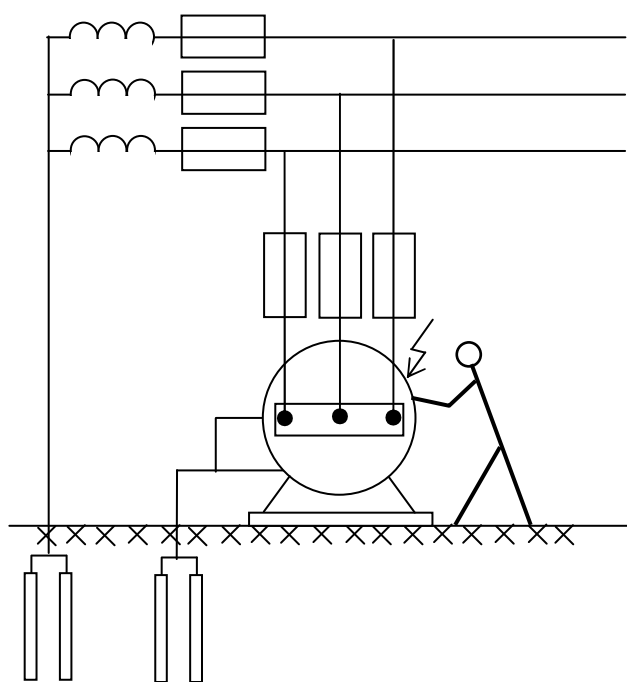


Рисунок 22.2 – Защитное заземление в трехпроводной линии

В качестве искусственных заземлителей применяют вертикально забитые в землю отрезки угловой стали сечением 50 x 50 мм, длиной 2–2,5 м или стальные стержни из круглой стали диаметром 12–14 мм, длиной до 4–5 м (прутковые заземлители). Отдельные заземлители связывают между собой в общий заземляющий контур стальными полосами сечением 40 x 4 мм; соединение выполняют на сварке. Заземляющие проводники присоединяют к заземляющему контуру (к стальной полосе) также сваркой, а к корпусам аппаратов и машин – болтами. Необходимое количество заземлителей в контуре определяется расчетом. Чем меньше должно быть электрическое сопротивление заземляющего устройства, тем больше требуется заземлителей. При этом большое значение имеет характер грунта, в котором выполняется заземление. Более благоприятные грунты – глинистые, наименее благоприятные – песчаные и скальные.

При устройстве заземлений и во время эксплуатации электрооборудования требуется проведение ряда измерений с целью проверки соответствия заземляющего устройства нормам. Для этого служат специальные приборы – измерители заземлений.

Такие измерения выполняют специалисты электрики в соответствии с имеющимися инструктивными указаниями.

Выводы

1. Степень поражения человека электрическим током зависит от частоты тока, величины тока, пути прохождения тока через тело человека, и от физического состояния организма человека.

2. Величина допустимого значения напряжения прикосновения определяется степенью электробезопасности условий работы персонала.

3. Для обеспечения безопасного ведения работ с электроустановками проводят организационные и технические мероприятия и применяют защитные средства.

Вопросы для самопроверки

1. Какая сила тока считается безусловно опасной для жизни человека?

2. Что понимают под электрическим ударом? Охарактеризуйте степени тяжести электротравм от электрического удара.

3. Что понимают под электрическим ожогом? Охарактеризуйте степени поражения при электрическом ожоге.

4. Что понимают под металлизацией кожи? Охарактеризуйте степени поражения при металлизации кожи.

5. Объясните, что такое электроофтальмия и каково ее воздействие на человека.

6. Что понимают под напряжением прикосновения? Какие величины напряжения прикосновения считают опасными для жизни человека?

7. Какие бывают условия проведения работ по степени электробезопасности?

8. Охарактеризуйте организационные мероприятия по обеспечению электробезопасности работ.

9. Какие технические мероприятия по обеспечению электробезопасности работ проводят на установках до 1000 В?

10. Какие защитные средства применяют в электроустановках до 1000 В?

11. Что понимают под защитным заземлением? Принцип действия.

12. Что понимают под защитным занулением? Принцип действия.

13. Основные причины поражения людей электрическим током на строительных площадках.

14. Как выполняют заземление корпусов строительных машин?

15. В чем особенности заземления строительных кранов?

16. Как действует заземление в электроустановках с изолированной нейтралью?

Раздел VII. ЗАДАЧИ И ПРИМЕРЫ ИХ РЕШЕНИЯ

23 ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задача 23.1 Для электрической цепи на рисунке 23.1 определить ток I , напряжение на зажимах потребителя U_H , мощность источника питания P_1 и мощность P_H внешней цепи, КПД источника питания. Построить внешнюю характеристику $U(I)$ источника питания. Исходные данные для расчета: ЭДС источника питания E , внутреннее сопротивление источника питания R_0 , сопротивление нагрузки R_H – приведены в таблице 23.1.

Таблица 23.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E , В	10	10	10	10	12	12	12	15	15	15	15
R_0 , Ом	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	0,5
R_H , Ом	4	6	3,5	5,5	5	7	7,5	4	5	5,5	6,5

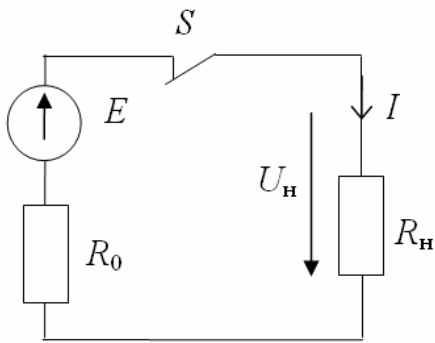


Рисунок 23.1 – Схема цепи к задаче 23.1

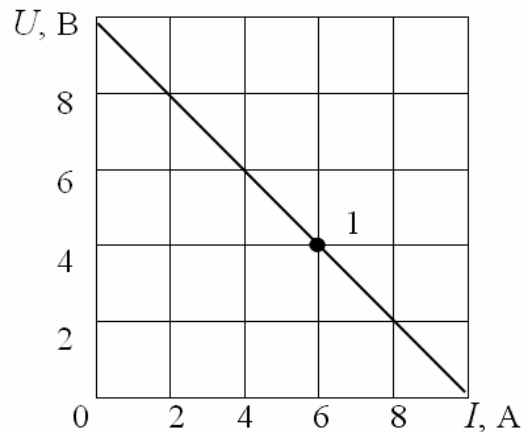


Рисунок 23.2 – Внешняя характеристика источника питания

Решение задачи для варианта К.

По закону Ома для полной цепи определяем величину тока нагрузки:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_H} = \frac{10}{1 + 4} = 2 \text{ А.}$$

Напряжение на зажимах источника питания и потребителя составит

$$U = U_H = R_H \cdot I = 4 \cdot 2 = 8 \text{ В.}$$

Мощность источника питания: $P_1 = E \cdot I = 10 \cdot 2 = 20 \text{ Вт.}$

Мощность внешней цепи (на нагрузке): $P_H = U_H \cdot I = 8 \cdot 2 = 16 \text{ Вт.}$

Потери мощности внутри источника: $P_0 = I^2 \cdot R_0 = 2^2 \cdot 1 = 4 \text{ Вт.}$

КПД: $\eta = P_H / P_1 = 16 / 20 = 0,8$ (или 80%).

Внешняя характеристика источника питания $U(I)$ при постоянных значениях E и P_{XX} составит:

при холостом ходе (контакты выключателя S разомкнуты)

$$I = I_{XX} = 0; \quad U = U_{XX} = E = 10 \text{ В;}$$

при коротком замыкании (выключатель S замкнут и $R_H = 0$)

$$I = I_{KЗ} = E/R_0 = 10/1 = 10 \text{ А}; U_{KЗ} = R_{KЗ} \cdot I_{KЗ} = 0.$$

Зависимость $U(I)$ является линейной, поэтому данные режимов холостого хода и короткого замыкания определяют внешнюю характеристику источника питания (рис. 22.2). По ней и значениям тока нагрузки I можно определить соответствующее напряжение U источника. Например, для точки I при $I = 6 \text{ А}$, напряжение $U = 10 - 6 = 4 \text{ В}$, поскольку по второму закону Кирхгофа $U = E - R_0 I$.

Уравнение баланса мощностей (мощность источника питания равна мощности, выделенной в виде теплоты в сопротивлениях R_0 и R_H):

$$E I = R_0 \cdot I^2 + R_H I^2; \quad 10 \cdot 2 = 1 \cdot 2^2 + 4 \cdot 2^2; \quad 20 = 20 \text{ Вт}.$$

Задача 23.2 Для электрической цепи (условие предыдущей задачи) определить при каком сопротивлении нагрузки R_H источник питания отдаст наибольшую мощность и каким является при этом КПД установки? Построить график изменения полезной мощности в зависимости от сопротивления нагрузки $P_H(R_H)$. Задачу решить в общем виде.

Решение задачи для варианта К. Мощность, выделяющаяся в сопротивлении нагрузки:

$$P_H = R_H \cdot I^2 = \frac{E^2}{(R_0 + R_H)^2} R_H.$$

Для определения наибольшей мощности, отдаваемой источником электрической энергии, берут первую производную мощности по сопротивлению нагрузки и приравнивают ее к нулю:

$$\frac{dP_H}{dR_H} = \frac{(R_0 + R_H)^2 - 2 \cdot (R_0 + R_H) \cdot R_H}{(R_0 + R_H)^4} \cdot E^2 = 0.$$

После преобразований получим $R_H = R_0$, т. е. источник отдает наибольшую мощность при равенстве сопротивления нагрузки внутреннему сопротивлению источника. Максимальная мощность, отдаваемая источником электроэнергии во внешнюю цепь потребителю при $R_H = R_0$, будет равна

$$P_{H.\max} = \frac{R_H \cdot E^2}{(R_0 + R_H)^2} = \frac{E^2}{4 \cdot R_0} \quad \text{Вт}.$$

КПД источника

$$\eta = \frac{P_H}{P_1} = \frac{R_H \cdot I^2}{(R_0 + R_H) \cdot I^2} = \frac{R_H}{R_0 + R_H} = \frac{R_0 \cdot I^2}{2 \cdot R_0 \cdot I^2} = 0,5,$$

т. е. $\eta = 50\%$. Можно показать, что при $R_H = 0$ (короткое замыкание) $\eta = 0$; при $R_H = R_0$ КПД $\eta = 0,5$; при $R_H = \infty$ КПД $\eta = 0$.

При изменении сопротивления нагрузки R_H полезная мощность изменяется в соответствии с уравнением

$$P_H = \frac{R_H \cdot E^2}{(R_0 + R_H)^2} = \frac{E^2}{R_0} \left[\frac{a}{(a+1)^2} \right] = \frac{E^2}{R_0} K,$$

где $K = a/(a+1)^2$;

$$a = R_0/R_H.$$

При $R_0 = R_H$, $a = 1$, $P_H = 0,25 \cdot E^2/R_0$.

Принимая E и R_0 постоянными и задаваясь разными значениями отношения R_0/R_H , можно получить график, который показывает в относительных единицах изменение полезной мощности $P_H = E^2/R_0$ в функции сопротивления нагрузки. Полученная зависимость показана на рисунке 23.3.

Задача 23.3 Для условий задачи 23.1 построить зависимость напряжения U на зажимах источника питания, мощности источника питания P_1 , потерь мощности P_0 и КПД η установки от тока I при изменении сопротивления нагрузки в пределах $R_H = (0, \infty)$. ЭДС источника питания считать неизменной.

Решение задачи для варианта К.

Порядок расчета для $R_H = 4$ Ом приведен в задаче 23.1. Для других значений нагрузки результаты расчета представлены в таблице 23.2.

На рисунке 23.3 приведены графики соответствующих величин в функции тока нагрузки.

Таблица 23.2

R_H	0	0,5	1	2	4	6	7	9	∞
I, A	10	6,7	5	3,3	2	1,4	1,2	1	0
U, B	0	3,3	5	6,7	8	8,6	8,8	9	10
$P_1, Bт$	100	66,7	50	33,3	20	14,3	12,5	10	0
$P_2, Bт$	0	22,2	25	22,2	16	12,3	10,9	1	0
$P_0, Bт$	100	44,4	25	11,1	4	2,1	1,6	1	0
η	0	0,3	0,3	0,7	0,8	0,85	0,88	0,9	1

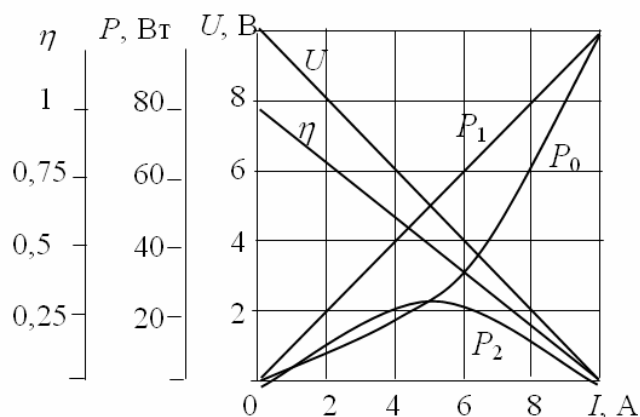
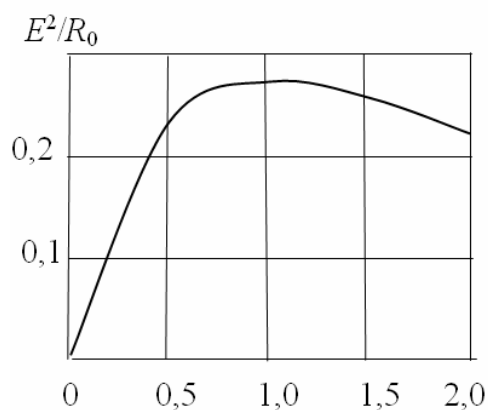


Рисунок 23.3 – Зависимость полезной мощности от сопротивления нагрузки

Рисунок 23.4 – Расчетные графики

Задача 23.4 Для электрической цепи постоянного тока (рис. 23.5) определить эквивалентное сопротивление потребителя $R_{12\text{экв}}$, ток нагрузки, напряжение на зажимах потребителя U_{12} , мощность потребителя P_{12} и мощность источника питания P_1 , КПД установки, составить баланс мощностей. Исходные данные: положение выключателей $S1-S4$, ЭДС источника E , внутреннее сопротивление источника R_0 , сопротивления резисторов $R_1 - R_4$ для соответствующих вариантов приведены в таблице 23.3.

Таблица 23.3

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Замкнуты выключатели	S1	S1	S2	S3	S4		S1	S2	S3	S4	
$E, \text{В}$	12	10	10	10	10	10	8	8	8	8	8
$R_0, \text{Ом}$	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$R_1, \text{Ом}$	6	5	5	5	7	7	6	5	5	5	5
$R_2, \text{Ом}$	6	4	5	5	5	6	5	6	5	6	6
$R_3, \text{Ом}$	5	6	6	5	6	7	5	5	4	4	5
$R_4, \text{Ом}$	5	5	5	5	7	6	5	5	4	5	4

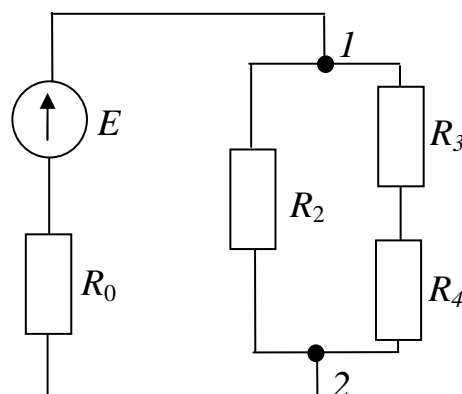
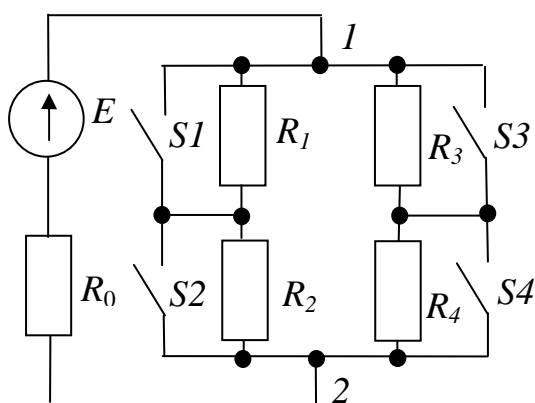


Рисунок 23.5 – Схема цепи к задаче 23.4 Рисунок 23.6 – Схема цепи по варианту К

Решение задачи для варианта К.

С учетом того, что выключатель $S1$ для варианта К замкнут, схема цепи имеет вид, показанный на рисунке 23.6.

Эквивалентное сопротивление потребителя

$$R_{12\text{экв}} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot (5 + 5)}{6 + 5 + 5} = 3,75 \text{ Ом.}$$

Ток нагрузки

$$I = \frac{E}{R_0 + R_{12\text{экв}}} = \frac{12}{0,5 + 3,75} \approx 2,82 \text{ А.}$$

Напряжение на зажимах потребителя

$$U_{12} = I \cdot R_{12\text{экв}} = 2,82 \cdot 3,75 \approx 10,59 \text{ В.}$$

Мощность потребителя

$$P_H = I \cdot U_{12} = 2,82 \cdot 10,59 = 29,9 \text{ Вт.}$$

Мощность источника питания

$$P_{ист} = I \cdot E = 2,82 \cdot 12 = 33,84 \text{ Вт.}$$

КПД установки

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ист}} = \frac{29,9}{33,84} \approx 0,88 \text{ .}$$

Баланс мощностей

$$P_{ист} = \Delta P_{ист} + P_H = R_0 \cdot I^2 + P_H ,$$

$$33,84 \approx 0,5 \cdot 2,82^2 + 29,9 ,$$

$$33,84 \approx 33,85.$$

Абсолютная погрешность расчета

$$\Delta = 33,85 - 33,84 = 0,01 \text{ Вт.}$$

Относительная погрешность расчета

$$\delta = \frac{\Delta}{P_{ср}} = \frac{0,01}{(33,85 + 33,84) / 2} \cdot 100\% = 0,03\% \text{ .}$$

Полученная точность приемлема для инженерных расчетов.

Задача 23.5 Для цепи (рис. 23.7) определить эквивалентное сопротивление $R_{экв}$ и общий ток I в ветви, а также падение напряжения на резисторах R_1 , R_2 , R_8 . Внутренним сопротивлением источника пренебречь. Исходные данные приведены в таблице 23.4.

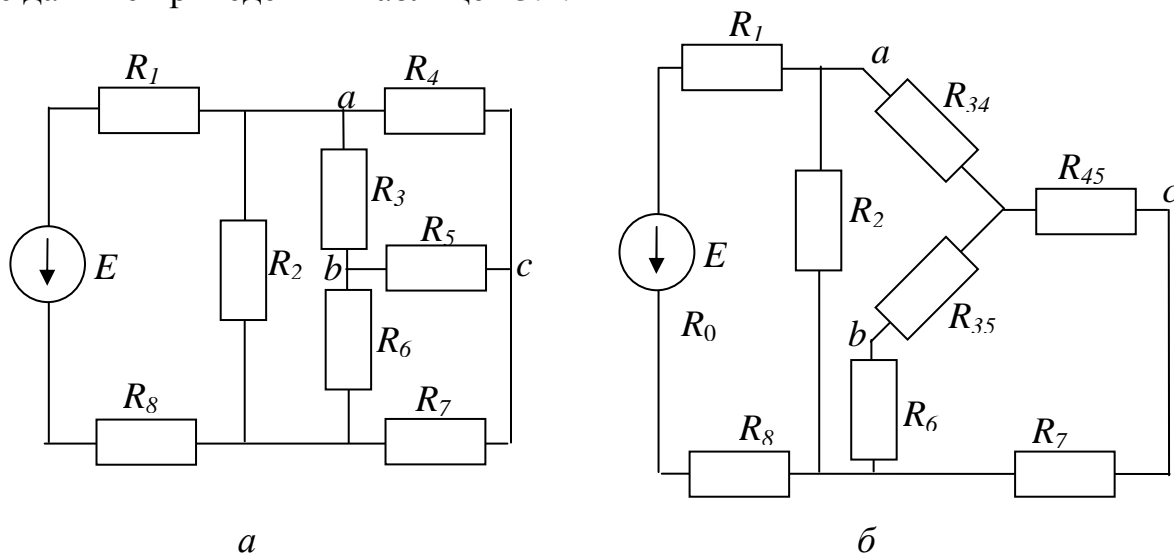


Рисунок 23.7 – Схема цепи к задаче 23.5: *а* – исходная, *б* – преобразованная

Таблица 23.4

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E, В$	50	40	40	50	50	60	60	60	70	70	70
$R_1, \text{ Ом}$	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
$R_2, \text{ Ом}$	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6
$R_3, \text{ Ом}$	20	20	30	30	30	30	30	25	25	25	25

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_4 , Ом	30	30	30	35	35	35	35	35	40	40	40
R_5 , Ом	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60	60
R_6 , Ом	100	100	100	90	90	90	90	80	80	80	80
R_7 , Ом	5	5	5	5	5	8	8	8	8	8	8
R_8 , Ом	1,8	1	1	2	2	3	3	2	2	3	3

Решение задачи для варианта К.

Преобразовав «треугольник» сопротивлений R_3 , R_4 , R_5 в эквивалентную «звезду», получим:

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30 + 50} = 6 \text{ Ом}, \quad R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{30 \cdot 50}{20 + 30 + 50} = 15 \text{ Ом},$$

$$R_{35} = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{20 \cdot 50}{20 + 30 + 50} = 10 \text{ Ом}.$$

Суммарное (эквивалентное) сопротивление последовательно включенных резисторов R_{45} и R_7 : $R_{\text{эKB1}} = R_{45} + R_7 = 15 + 5 = 20 \text{ Ом}$. Суммарное (эквивалентное) сопротивление последовательно включенных резисторов R_{35} и R_6 : $R_{\text{эKB2}} = R_{35} + R_6 = 10 + 10 = 20 \text{ Ом}$. Эквивалентное сопротивление ветвей с сопротивлением $R_{\text{эKB1}}$, R_{34} и $R_{\text{эKB2}}$:

$$R_{\text{эKB3}} = R_{34} + \frac{R_{\text{эKB1}} \cdot R_{\text{эKB2}}}{R_{\text{эKB1}} + R_{\text{эKB2}}} = 6 + \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} = 16 \text{ Ом}.$$

Общее сопротивление всей цепи:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_8 + \frac{R_2 \cdot R_{\text{эKB3}}}{R_2 + R_{\text{эKB3}}} = 5 + 1,8 + \frac{4 \cdot 16}{4 + 16} = 10 \text{ Ом}.$$

Ток в неразветвленной части цепи: $I = E/R_{\text{общ}} = 50/10 = 5 \text{ А}$.

Падение напряжения на резисторах R_1 , R_2 и R_8 :

$$\Delta U_1 = R_1 \cdot I = 5 \cdot 5 = 25 \text{ В}; \quad \Delta U_8 = R_8 \cdot I = 1,8 \cdot 5 = 9 \text{ В};$$

$$\Delta U_2 = I \frac{R_2 \cdot R_{\text{эKB2}}}{R_2 + R_{\text{эKB2}}} = 5 \cdot \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} = 16 \text{ В}.$$

Проверка. На основании второго закона Кирхгофа имеем:

$$E = U_1 + U_2 + U_3 \text{ или } 50 \text{ В} = 25 + 9 + 16 = 50 \text{ В}.$$

Задача 23.6 Для электрической цепи (рис. 23.8) определить токи в ветвях, напряжения на всех элементах цепи, напряжение U_{13} между узлами 1-3, мощность и режим работы источника с ЭДС E_1 , мощность приемника с сопротивлением R_3 . Исходные данные приведены в таблице 23.5.

Таблица 23.5

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_1 , В	12	10	10	12	12	10	12	13	14	15	10
E_2 , В	13,5	12	14	14	12	10	10	11	12	10	15
R_{01} , Ом	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_3, \text{ Ом}$	3	4	5	4	4	3	4	4	5	6	4
$R_4, \text{ Ом}$	4	4	3	5	4	3	5	5	5	4	6
$R_5, \text{ Ом}$	4	3	3	5	4	3	5	5	5	4	6

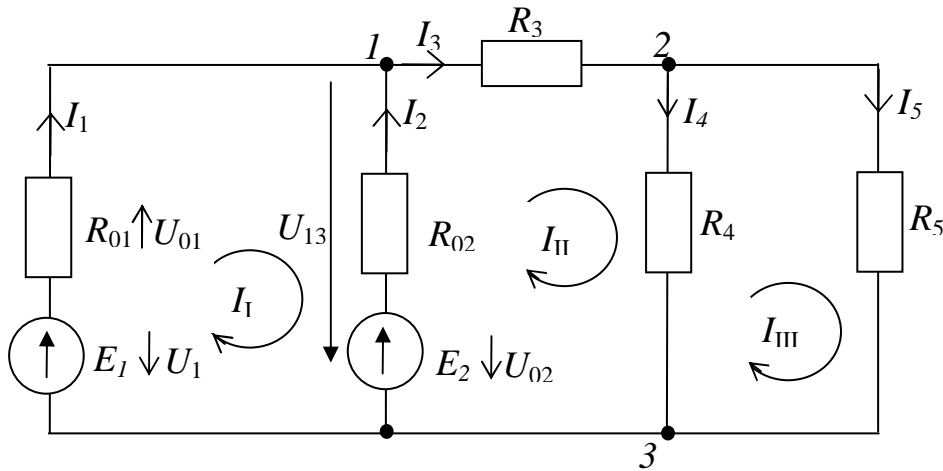


Рисунок 23.8 – Схема цепи к задаче 23.6

Решение задачи для варианта К.

Схема цепи имеет три узла и пять ветвей. Для нахождения токов в ветвях нужно составить пять уравнений: два уравнения по 1-му закону Кирхгофа и три уравнения по 2-му закону Кирхгофа.

Задаемся направлениями токов в ветвях и обхода контуров (I, II и III-го) и наносим их на схему.

Записываем уравнение по 1-му закону Кирхгофа для узлов 1 и 2 и по 2-му закону Кирхгофа для выбранных контуров. Система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \text{для узла 1} \quad & I_1 + I_2 - I_3 = 0, \\
 \text{для узла 2} \quad & I_3 - I_4 - I_5 = 0, \\
 \text{для контура I} \quad & R_{01} \cdot I_3 + R_{02} \cdot I_2 = E_1 - E_2, \\
 \text{для контура II} \quad & R_{02} \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 + R_4 \cdot I_4 = E_2, \\
 \text{для контура III} \quad & -R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 = 0.
 \end{aligned}$$

Решение системы дает значение токов в ветвях:

$$I_1 = -7,93 \text{ А}; I_2 = 11,03 \text{ А}; I_3 = 3,1 \text{ А}; I_4 = I_5 = 1,55 \text{ А}.$$

Поскольку ток I_1 имеет знак минус, его действительное направление противоположно принятому на схеме (рис. 23.8).

Напряжения на резисторах определяем по закону Ома:

$$\begin{aligned}
 U_3 = R_3 \cdot I_3 = 2 \cdot 3,1 = 6,2 \text{ В}; \quad U_4 = R_4 \cdot I_4 = 4 \cdot 1,55 = 6,2 \text{ В}; \\
 U_5 = R_5 \cdot I_5 = 4 \cdot 1,55 = 6,2 \text{ В}.
 \end{aligned}$$

Напряжение между узлами 1 и 3 находим используя второй закон Кирхгофа:

$$E_2 = U_{02} + U_{13}; \quad U_{13} = E_2 - U_{02} = E_2 - R_{02} \cdot I_2 = 13,5 - 0,1 \cdot 11 = 12,4 \text{ В}.$$

Мощность источника ЭДС E_2

$$P_2 = E_2 \cdot I_2 = 13,5 \cdot 11 = 148,5 \text{ Вт.}$$

Мощность приемника

$$P_3 = R_3 \cdot I_3^2 = U_3 \cdot I_3 = 6,2 \cdot 3,1 = 19,2 \text{ Вт.}$$

В источнике ЭДС E_1 ток и ЭДС направлены навстречу. Это означает, что при заданных условиях задачи он потребляет электрическую энергию.

Поскольку источник ЭДС E_1 работает в режиме потребления электрической энергии, т. е. является электроприемником, уравнение баланса мощностей имеет вид

$$E_2 \cdot I_2 = E_1 \cdot I_1 + R_{01} \cdot I_1^2 + R_{02} \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2.$$

После подстановки полученных значений имеем

$$13,5 \cdot 11 = 12 \cdot 7,9 + 0,05 \cdot 7,9^2 + 0,1 \cdot 11^2 + 2 \cdot 3,1^2 + 4 \cdot 1,55^2.$$
$$148,5 \text{ Вт} = 148,5 \text{ Вт.}$$

Полученное равенство подтверждает правильность расчета.

Задача 23.7 Для схемы электрической сети и исходных данных задачи 23.6 определить токи в ветвях электрической цепи методом контурных токов.

Решение задачи для варианта К.

Система уравнений контурных токов для заданной схемы (рис. 22.8) имеет вид

$$\begin{cases} R_{11}I_I - R_{12}I_{II} - R_{13}I_{III} = E_I; \\ R_{21}I_I - R_{22}I_{II} - R_{23}I_{III} = E_{II}; \\ R_{31}I_I - R_{32}I_{II} - R_{33}I_{III} = E_{III} \end{cases},$$

где сопротивления и контурные ЭДС имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_{01} + R_{01} = 0,15 \text{ Ом}; & R_{22} &= R_{02} + R_2 + R_4 = 6,1 \text{ Ом}; \\ R_{33} &= R_4 + R_5 = 8 \text{ Ом}; & R_{12} &= R_{21} = -R_{02} = -0,1 \text{ Ом}; \\ R_{13} &= R_{31} = 0; & R_{23} &= R_{32} = -R_4 = -4 \text{ Ом}; \\ E_I &= E_1 - E_2 = -1,5 \text{ В}; & E_{II} &= E_2 = 13,5 \text{ В}; & E_{III} &= 0. \end{aligned}$$

Решив полученную систему уравнений контурных токов, получим их значения $I_I = -7,93 \text{ А}$, $I_{II} = 3,1 \text{ А}$, $I_{III} = 1,55 \text{ А}$.

Далее находим токи в ветвях:

$$I_1 = I_I = -7,93 \text{ А}, \quad I_2 = I_{II} - I_I = 11,03 \text{ А}, \quad I_3 = I_{II} = 3,1 \text{ А},$$
$$I_4 = I_{II} - I_{III} = 1,55 \text{ А}, \quad I_5 = I_{III} = 1,55 \text{ А}.$$

Как отмечено раньше, знак минус у токов I_1 и I_4 означает, что их действительные направления противоположны принятым на схеме замещения.

Задача 23.8 Для схемы электрической цепи и исходных данных задачи 23.6 определить токи в ветвях методом узловых потенциалов.

Решение задачи для варианта К.

Определяем значение коэффициентов матрицы проводимостей системы узловых потенциалов (3.8):

$$G_{11} = \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{2} = 30,5 \text{ См},$$

$$G_{22} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = 1 \text{ См}, \quad G_{12} = G_{21} = -\frac{1}{R_3} = -\frac{1}{2} = -0,5 \text{ См}.$$

Значения токов узлов

$$I_{y1} = \frac{E_1}{R_{01}} + \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{12}{0,05} + \frac{13,5}{0,1} = 375 \text{ А}, \quad I_{y2} = 0.$$

Полученная система имеет вид

$$\begin{bmatrix} 30,5 & -0,5 \\ -0,5 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 375 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Решая систему, получаем $\varphi_1 = 12,4 \text{ В}$, $\varphi_2 = 6,2 \text{ В}$.

Определяем токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{E_1 + (\varphi_3 - \varphi_1)}{R_{01}} = \frac{12 + (0 - 12,4)}{0,05} = -7,98 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{E_2 + (\varphi_3 - \varphi_1)}{R_{02}} = \frac{13,5 + (0 - 12,4)}{0,1} = 11,08 \text{ А}, \quad I_3 = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R_2} = \frac{12,4 - 6,2}{2} = 3,1 \text{ А},$$

$$I_4 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_3)}{R_4} = \frac{6,2}{4} = 1,55 \text{ А}, \quad I_5 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_3)}{R_5} = \frac{6,2}{4} = 1,55 \text{ А}.$$

Задача 23.9. Для схемы электрической цепи и исходных данных задачи 23.6, пользуясь методом эквивалентного генератора рассчитать и построить зависимости тока в ветви с резистором R_3 и напряжения U_{12} между узлами 1 и 2 от величины сопротивления резистора R_3 при изменении его сопротивления от нуля до 12 Ом.

Решение задачи для варианта К.

В этом случае внутреннее сопротивление эквивалентного генератора проще рассчитать, не определяя ток короткого замыкания. При разомкнутых зажимах 1 и 2 и закороченных источниках ЭДС исходная схема примет вид, показанный на рисунке 23.9, в.

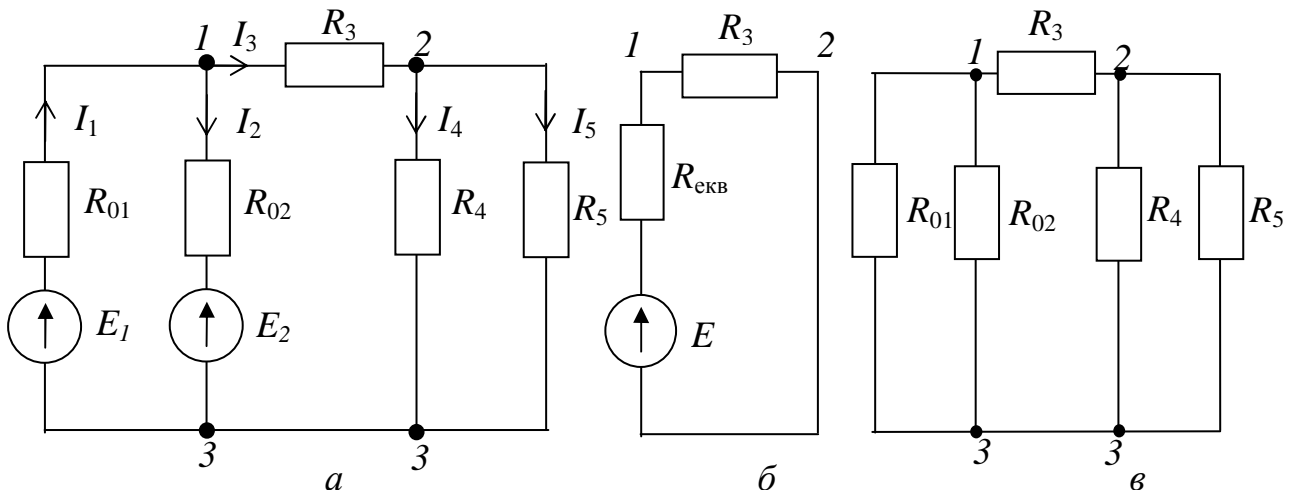


Рисунок 23.9 – Преобразование схемы по методу эквивалентного генератора

Находим эквивалентные сопротивления ветвей, подключенных к узлам 1-3 и 2-3 (рис. 22.9, в):

$$R_{13} = \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = \frac{0,05 \cdot 0,1}{0,05 + 0,1} = 0,033 \text{ Ом}, \quad R_{23} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2 \text{ Ом}.$$

Относительно узлов 1 и 2 резисторы R_{13} и R_{23} включены последовательно, следовательно внутреннее сопротивление эквивалентного генератора $R_{\text{экв}} = 2,033 \text{ Ом}$.

Для определения ЭДС эквивалентного генератора необходимо рассчитать потенциалы узлов 1 и 2. В нашем случае их проще определить, пользуясь методом узловых потенциалов. Так, если принять потенциал узла 3 равным нулю, то при разомкнутых зажимах токи в ветвях с резисторами R_4 и R_5 равны нулю. Следовательно потенциал узла 2 также равен нулю.

Потенциал узла 1 находим из уравнения (3.9):

$$\varphi_1 = \frac{I_{y1}}{G_{11}} = \frac{375}{30} = 12,5 \text{ В},$$

где $G_{11} = \frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} = \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,1} = 30 \text{ См}, \quad I_{y1} = \frac{E_1}{R_{01}} + \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{12}{0,05} + \frac{13,5}{0,1} = 375 \text{ А}.$

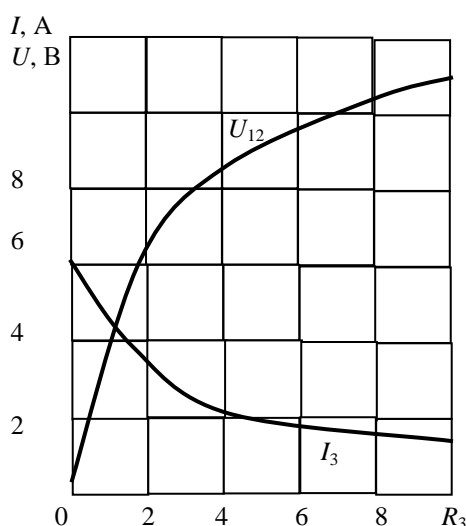


Рисунок 23.10 – Искомые зависимости тока и напряжения

ЭДС эквивалентного генератора

$$E_{\Gamma} = \varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1 = 12,5 \text{ В}.$$

Ток I_3 в ветви с резистором R_3 и напряжение между узлами 1 и 2

$$I_3 = E_{\Gamma} / (R_3 + R_{\text{экв}}), \quad U_{12} = R_3 \cdot I_3.$$

Из полученных соотношений построим искомые графики (рис. 23.10).

Решение данной задачи другими методами требует больших затрат времени.

24 ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Задача 24.1 Ток изменяется по закону $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$. Определить его комплексную амплитуду и комплексный действующий ток. Исходные данные приведены в таблице 24.1

Таблица 24.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_m, \text{ А}$	8	6	4	2	3	5	7	9	5	4	3
$\psi_i, \text{ рад}$	$\pi/18$	$-\pi/24$	$\pi/30$	$\pi/40$	$\pi/10$	$\pi/16$	$\pi/20$	$\pi/26$	$-\pi/14$	$\pi/22$	$\pi/28$

Решение задачи для варианта К.

Для синусоидального тока с амплитудой $I_m = 8$ А и начальной фазой $\psi_i = \pi/18$ комплексная амплитуда тока и комплексный ток соответственно равны

$$I_m = 8e^{j\frac{\pi}{18}} = 8(\cos\frac{\pi}{18} + j\sin\frac{\pi}{18}) = 7,88 + j1,39,$$

$$\dot{I} = \frac{8}{\sqrt{2}}e^{j\frac{\pi}{18}} \cong 5,7(\cos\frac{\pi}{18} + j\sin\frac{\pi}{18}) = 5,57 + j0,98.$$

Задача 24.2 Комплексная амплитуда тока $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$. Записать выражение для синусоидального тока, который изменяется с частотой f . Исходные данные приведены в таблице 24.2.

Таблица 24.2

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_m , А	25	23	21	19	17	15	13	9	7	5	3
ψ_i , рад	$-\pi/12$	$-\pi/18$	$-\pi/22$	$\pi/20$	$\pi/30$	$\pi/26$	$-\pi/20$	$\pi/16$	$\pi/24$	$\pi/14$	$\pi/18$
f , Гц	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50	50

Решение задачи для варианта К.

Угловая частота тока $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$ 1/с.

Для перехода от комплексной амплитуды к мгновенному значению тока надо комплексную амплитуду $\dot{I}_m = 25e^{-j\frac{\pi}{12}}$ умножить на $e^{j\omega t} = e^{j314t}$ и взять мнимую часть полученного комплексного числа

$$i = \text{Im}(25e^{-j\pi/12} e^{j314t}) = \text{Im}(25e^{j(314t - \pi/12)}) = 25\sin(314t - \pi/12).$$

Задача 24.3 В сеть переменного тока при напряжении U и частоте f включена идеальная катушка с индуктивностью L ($R_k = 0$). Определить реактивную мощность Q катушки, энергию W_{Lm} , которая запасается в магнитном поле катушки, записать выражение для мгновенных значений напряжения u , тока i , ЭДС самоиндукции e , мгновенной мощности p и средней мощности P за период, если начальная фаза напряжения равна ψ_u . Построить временную и векторную диаграммы. Исходные данные приведены в таблице 24.3.

Таблица 24.3

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , В	120	110	100	90	80	70	120	110	100	90	80
f , Гц	50	50	50	50	50	60	60	60	60	50	50
L , мГн	9	7	5	6	8	9	7	5	6	8	10
ψ_u , рад	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$

Решение задачи для варианта К.

Индуктивное сопротивление катушки: $X_L = \omega L = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,009 = 3 \text{ Ом}$.

Действующее значение тока: $I = U/X_L = 120/3 = 40 \text{ А}$.

Реактивная мощность цепи: $Q = U \cdot I = 120 \cdot 40 = 4800 \text{ ВАр}$.

Максимальная энергия, которая запасается в магнитном поле катушки:

$$W_{Lm} = L \cdot I^2 = 0,009 \cdot 40^2 = 14,4 \text{ Дж}.$$

Амплитудные значения напряжения $U_m = \sqrt{2} \cdot U = 1,41 \cdot 120 = 169,2 \text{ В}$ и тока $I_m = \sqrt{2} \cdot I = 1,41 \cdot 40 = 56,4 \text{ А}$.

Мгновенные значения:

напряжения $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = 169,2 \sin(3,14t + \pi/2) \text{ В}$;

тока $i = I_m \cdot \sin \omega t = 56,4 \cdot \sin 314 \text{ А}$;

ЭДС самоиндукции катушки $e = -u = 169,2 \cdot \sin(3,14t - \pi/2) \text{ В}$;

мощности цепи $p = u \cdot i = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) \cdot I_m \cdot \sin \omega t = U_m \cdot \cos \omega t \cdot I_m \cdot \sin \omega t = U_m \cdot I_m \cdot \sin 2\omega t / 2$, так как $\sin(\omega t + \pi/2) = \cos \omega t$, а $\sin 2\omega t = 2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t$.

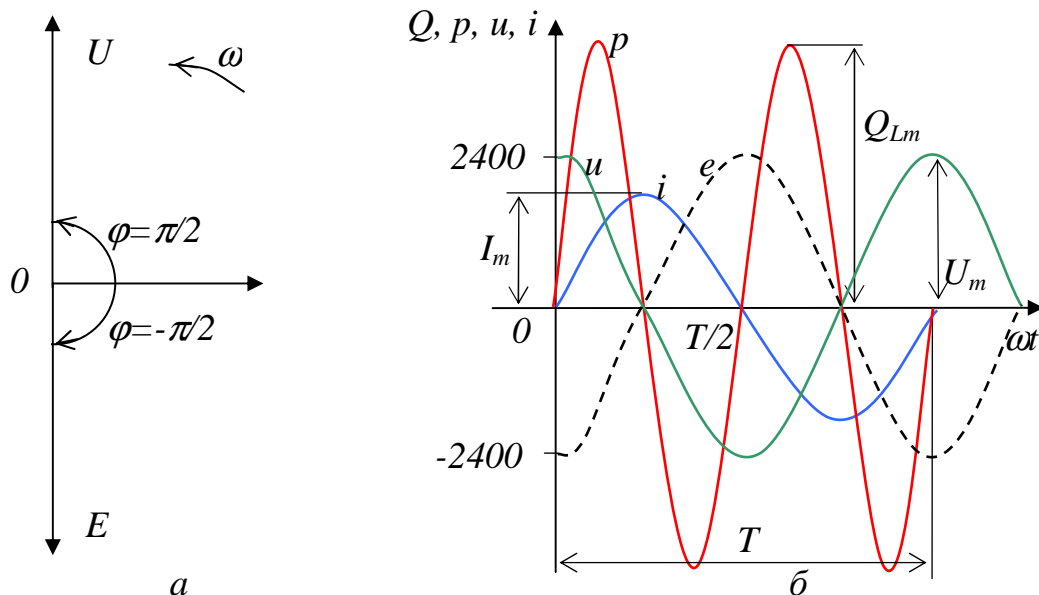


Рисунок 24.1 – Векторная диаграмма (а) и графики мгновенных значений (б) к задаче 24.3

Для действующих значений напряжения и тока:

$$p = u \cdot i = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t = 120 \cdot 40 \cdot \sin(2 \cdot 314 \cdot t) = 4800 \cdot \sin 628t, \text{ ВА}.$$

Средняя мощность за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot \sin 2\omega t \cdot dt = 0.$$

Векторная диаграмма для действующих значений напряжения и тока приведена на рисунке 24.1, а.

График изменения мгновенной мощности представляет собой синус-

соиду с двойной частотой и амплитудой Q_{Lm} (рис. 24.1, б). При этом реактивная мощность

$$Q_L = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} = U \cdot I = 120 \cdot 40 = 4800 \text{ вар.}$$

Задача 24.4 К сети переменного тока при напряжении U и частоте f подключен конденсатор емкостью C ($R_C = 0$). Определить реактивное сопротивление конденсатора X_C , ток i , реактивную мощность Q_C , максимальную энергию W_{Cm} , запасующуюся в электрическом поле конденсатора. Записать выражения для мгновенных значений тока i и мгновенной мощности p . Построить временную и векторную диаграммы. Исходные данные приведены в таблице 24.4.

Таблица 24.4

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , В	220	220	220	210	210	210	127	127	127	120	120
f , Гц	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50	50
C мкф	20	18	14	10	20	18	14	10	16	20	30
ψ_u , рад	0	0	0	30	30	30	60	60	60	157	157

Решение задачи для варианта К.

Реактивное сопротивление конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 160 \text{ Ом.}$$

Ток в цепи конденсатора: $I = U / X_C = 220 / 160 = 1,37 \text{ А.}$

Реактивная мощность цепи: $Q_C = U \cdot I = 220 \cdot 1,37 = 302 \text{ ВАр.}$

Максимальная энергия, которая запасается в электрическом поле конденсатора: $W_{Cm} = C \cdot U^2 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 220^2 = 968 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$

Мгновенное значение тока в цепи:

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = I_m \cdot \cos \omega t.$$

Мгновенная мощность цепи:

$$p = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = U_m \cdot I_m \frac{\sin 2\omega t}{2},$$

или для действующих значений тока и напряжения

$$p = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t = 220 \cdot \frac{220}{160} \cdot \sin(2 \cdot 314t) = 302 \sin 628t.$$

Векторная диаграмма тока и напряжения приведены на рисунке 24.2, а.

Временные графики напряжения, тока и мощности приведены на рисунке 23.2, б. График изменения мгновенной мощности во времени представляет собой синусоиду с двойной частотой и амплитудой, которая равна реактивной мощности:

$$Q_{Cm} = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{\sqrt{2}U \cdot \sqrt{2}I}{2} = U \cdot I = 220 \cdot 1,37 = 302 \text{ ВАр.}$$

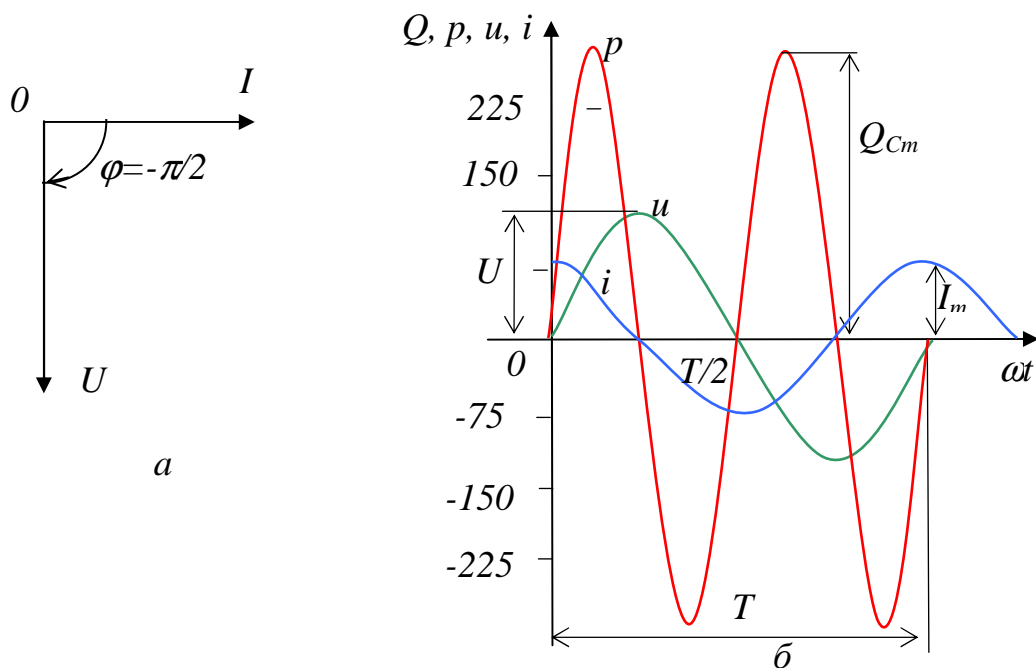


Рисунок 24.2 – Векторная диаграмма (а) и графики мгновенных значений (б) к задаче 24.4

Задача 24.5 В электрической цепи переменного тока напряжение U и ток I изменяются согласно выражениям $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ В и $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ А. Определить активную P , реактивную Q и полную S мощности цепи. Исходные данные приведены в таблице 24.5.

Таблица 26.5

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_m, В$	28,2	32	30	26	24	25	27	29	31	33	35
$\omega, 1/с$	628	628	628	314	314	314	314	314	628	628	628
$\psi_u, рад$	$4\pi/9$	$4\pi/9$	$4\pi/9$	$2\pi/9$	$2\pi/9$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/4$
$I_m, А$	2,82	2,6	2,4	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,0	2,8
$\psi_i, рад$	$5\pi/18$	$5\pi/18$	$\pi/30$	$\pi/40$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/8$	$2\pi/8$	$\pi/10$	$\pi/6$	$\pi/8$

Решение задачи для варианта К.

Мгновенное значение мощности цепи:

$$\begin{aligned}
 p &= u \cdot i = 28,2 \sin\left(628t + \frac{4\pi}{9}\right) \cdot 2,82 \sin\left(628t + \frac{5\pi}{18}\right) = \\
 &= 28,2 \cdot 2,82 \left\{ \frac{1}{2} [\cos(628t + 4\pi/9 - 628t - 5\pi/18) - \cos(628t + 4\pi/9 + 628t + 5\pi/18)] \right\} = \\
 &= 79,5 \left\{ \frac{1}{2} [\cos \pi/6 - \cos(1225t + 13\pi/18)] \right\},
 \end{aligned}$$

или для действующих значений напряжения и тока:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{28,2 \cdot 2,82}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{2} [\cos \pi/6 - \cos(1225t + 13\pi/18)] = \\
 &= 19,8 \cos \pi/6 - 19,8 \cos(1225t + 13\pi/18).
 \end{aligned}$$

Мощности цепи:

$$\text{активная } P = 19,8 \cos \pi / 6 = 19,8 \frac{\sqrt{3}}{2} = 17,1 \text{ Вт};$$

$$\text{реактивная } Q = 19,8 \sin \pi / 6 = 19,8 \frac{1}{2} = 9,9 \text{ вар};$$

$$\text{полная } S = U \cdot I = 19,8 \text{ ВА}.$$

Задача 24.6 Действующее значение напряжения, приложенного к электрической цепи (рис. 24.3) U , частота напряжения f , сопротивление R , индуктивность катушки L , емкость конденсатора C . Пользуясь комплексным методом, найти действующие значения токов в ветвях цепи и напряжений на ее элементах, полную S , активную P и реактивную Q мощности цепи. Исходные данные приведены в таблице 24.6.

Таблица 24.6

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , В	100	110	120	130	100	110	120	130	90	90	80
f , Гц	50	50	50	50	60	60	60	60	60	50	50
R , Ом	10	14	16	18	22	20	17	15	13	12	11
L , мГн	31,8	30	28	26	27	29	32	34	30	29	27
C , мкФ	318,5	310	300	280	260	250	270	290	300	310	305

Решение задачи для варианта К.

Приняв начальную фазу напряжения равной нулю, для комплекса напряжения можем записать

$$\dot{U} = 100e^{j0} = 100.$$

Комплексные сопротивления индуктивной катушки и конденсатора:

$$\underline{Z}_L = jX_L = j\omega L = j314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = j10 = 10e^{j\frac{\pi}{2}},$$

$$\underline{Z}_C = -jX_C = -j\frac{1}{\omega C} = -j\frac{1}{314 \cdot 318,5 \cdot 10^{-6}} = -j10 = 10e^{-j\frac{\pi}{2}},$$

где угловая частота $\omega = 2\pi f = 314 \text{ с}^{-1}$.

Для определения комплексных токов можно воспользоваться любым известным методом расчета электрических цепей, например, методом узловых потенциалов. Считая, что комплексный потенциал узла 2

равен нулю $\varphi_2 = 0$, имеем $\underline{Y}_{11} \cdot \dot{\varphi}_1 = \dot{I}_{11}$, откуда

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{\dot{I}_{11}}{\underline{Y}_{11}} = \frac{-j10}{0,1} = -j100 = 100e^{-j\frac{\pi}{2}},$$

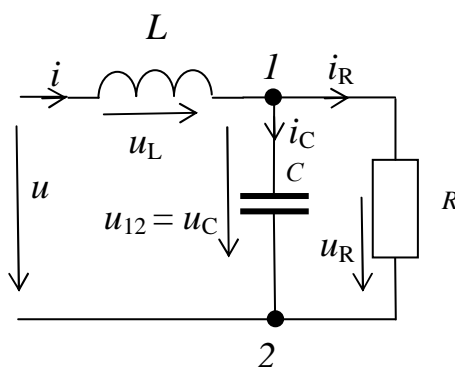


Рисунок 24.3 – Схема цепи к задаче 24.6

где комплексная узловая проводимость и расчетный комплексный ток в узле соответственно равны:

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{\underline{Z}_L} + \frac{1}{\underline{Z}_C} + \frac{1}{R} = \frac{1}{j10} + \frac{1}{(-j10)} + \frac{1}{10} = -j0,1 + j0,1 + 0,1 = 0,1,$$

$$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{11}} = \frac{100}{j10} = -j10.$$

Комплексные токи в ветвях

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} - \dot{\varphi}_1}{\underline{Z}} = \frac{100 + j100}{j10} = \frac{100\sqrt{2}e^{j\frac{\pi}{4}}}{10e^{j\frac{\pi}{2}}} = 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{\varphi}_1}{\underline{Z}_C} = \frac{-j100}{-j10} = 10, \quad \dot{I}_R = \frac{\dot{\varphi}_1}{R} = \frac{-j100}{10} = -j10 = 10e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Действующие значения токов $I = 14,1$ А, $I_R = I_C = 10$ А.

Комплексные напряжения на индуктивной катушке, конденсаторе и резисторе

$$\dot{U}_L = \underline{Z}_L \cdot \dot{I} = 10e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} = 141,2e^{j\frac{\pi}{4}};$$

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}_R = 10 \cdot 10e^{-j\frac{\pi}{2}} = 100e^{-j\frac{\pi}{2}};$$

$$\dot{U}_C = \underline{Z}_C \cdot \dot{I}_C = 10e^{-j\frac{\pi}{2}} \cdot 10 = 100e^{-j\frac{\pi}{2}}.$$

Действующие значения напряжений $U_L = 141,2$ В, $U_C = U_R = 100$ В.

Комплексная мощность

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I} = 100 \cdot 10\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} = 1410(\cos\frac{\pi}{4} + j\sin\frac{\pi}{4}) = 1000 + j1000.$$

Итак, полная, активная и реактивная мощности

$$S = |\underline{S}| = 1410 \text{ ВА}, \quad P = \operatorname{Re}(\underline{S}) = 1000 \text{ Вт}, \quad Q = \operatorname{Im}(\underline{S}) = 1000 \text{ вар}.$$

Задача 24.7 Для электрической цепи переменного тока (рис. 23.4, а) определить показания амперметров А, А₁, А₂, углы сдвига фаз φ , φ_1 и φ_2 между соответствующими токами \dot{I} , \dot{I}_1 и \dot{I}_2 и напряжением \dot{U} , построить векторную диаграмму токов и напряжений. Исходные данные (напряжение питания U , активное и реактивное сопротивления цепи) приведены в таблице 24.7.

Таблица 24.7

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U , В	120	110	100	90	80	86	94	104	114	124	136
R_1 , Ом	2	1,6	1,4	1,4	1,8	2	2,1	2,2	2,6	2,9	3,2
R_2 , Ом	1	0,8	0,6	0,7	0,9	1,3	1,5	1,6	1,4	1,1	2,0
X_L , Ом	6	5	4	5	6	7	6	5	4	7	8
X_C , Ом	9,95	9	8	7	10	12	8	9	7	10	9

Решение задачи для варианта К.

Полное сопротивление ветвей цепи:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{2^2 + 6^2} = 6,32 \text{ Ом}; \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{1^2 + 9,95^2} = 10 \text{ Ом}.$$

Углы сдвига фаз между токами и напряжениями соответствующих параллельных ветвей:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{2}{6,32} = 0,316; \quad \varphi_1 = 71^\circ 35';$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{1}{10} = 0,1; \quad \varphi_2 = -84^\circ 15'.$$

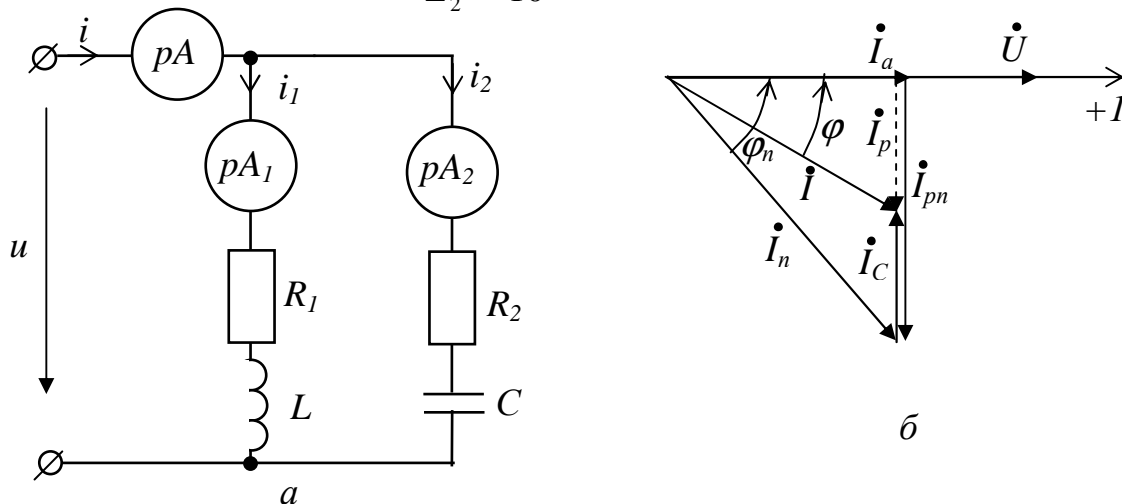


Рисунок 24.4 – К задаче 24.7: а – схема цепи;
б – векторные диаграммы для варианта К

Показания амперметров A_1 и A_2 в параллельных ветвях:

$$I_1 = U/Z_1 = 120/6,32 = 19 \text{ А}; \quad I_2 = U/Z_2 = 120/10 = 12 \text{ А}.$$

Активные составляющие токов в параллельных ветвях:

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 19 \cdot 0,316 = 6,01 \text{ А}, \quad I_{a2} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 12 \cdot 0,1 = 1,2 \text{ А}.$$

Реактивные составляющие токов в параллельных ветвях:

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = I_1 \cdot X_L/Z_1 = 19 \cdot 6/6,32 = 18,01 \text{ А};$$

$$I_{p2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = I_2 \cdot X_C/Z_2 = 12 \cdot 9,95/10 = 11,93 \text{ А}.$$

Активная и реактивная составляющие общего тока:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 6,01 + 1,2 = 7,21 \text{ А}; \quad I_p = I_{p1} + I_{p2} = 18,01 - 11,93 = 6,08 \text{ А}.$$

Общий ток в цепи:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{7,21^2 + 6,08^2} = 9,43 \text{ А}.$$

Угол сдвига фаз между током I и приложенным напряжением U :

$$\cos \varphi = I_a/I = 7,21/9,43 = 0,756; \quad \varphi = 40^\circ 10'.$$

Векторная диаграмма токов и напряжений для данного варианта расчета приведена на рисунке 24.4, б.

Задача 24.8 Решить задачу 24.7 методом проводимостей.

Решение задачи для варианта К.

Значение величин полных сопротивлений Z_1 , Z_2 , токов I_1 , I_2 и коэффициентов мощности $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$ определяем методом, изложенным в задаче 24.7.

Активные и реактивные проводимости параллельных ветвей

$$G = G_1 + G_2 = \frac{R_1}{Z_1^2} + \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{2}{6,32^2} + \frac{1}{10^2} = 0,06 \text{ См};$$

$$B = B_1 + B_2 = \frac{X_L}{Z_1^2} - \frac{X_C}{Z_2^2} = \frac{6}{6,32^2} - \frac{9,95}{10^2} = 0,05 \text{ См}.$$

Полная проводимость всей цепи:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{0,06^2 + 0,05^2} = 0,0784 \text{ См}.$$

Общий ток в цепи: $I = U \cdot Y = 120 \cdot 0,0784 = 9,4 \text{ А}.$

Угол сдвига фаз между током I и приложенным напряжением U :

$$\cos\varphi = G/Y = 0,06/0,0784 = 0,765; \varphi = 40^\circ 10'.$$

Задача 24.9 Определить активную P , реактивную Q и полную S мощность электрической цепи (рис. 24.5). Значения токов I_1 , I_2 , I_3 , активных R_1 , R_2 , R_3 и реактивных X_L и X_C сопротивлений приведены в таблице 24.8.

Таблица 24.8

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_1, \text{ А}$	5	5	5	4	4	4	3	3	3	5	5
$I_2, \text{ А}$	3	3	3	2	2	2	1	1	1	2	2
$I_3, \text{ А}$	4	4	4	5	5	5	4	4	4	3	3
$R_1, \text{ Ом}$	10	10	10	9	9	9	8	8	8	7	7
$R_2, \text{ Ом}$	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	3
$R_3, \text{ Ом}$	5	5	5	6	6	6	7	7	7	5	5
$X_L, \text{ Ом}$	8	8	8	7	7	7	6	6	6	8	8
$X_C, \text{ Ом}$	5,6	5	5	6	6	6	7	7	7	5	5

Решение задачи для варианта К.

Активная мощность цепи:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = I_1^2 \cdot R + I_2^2 \cdot R + I_3^2 \cdot R = 5^2 \cdot 20 + 3^2 \cdot 6 + 4^2 \cdot 5 = 384. \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность цепи:

$$Q = Q_L - Q_C = I_2^2 \cdot X_L - I_3^2 \cdot X_C = 32 \cdot 8 - 42 \cdot 5,6 = -17,6 \text{ вар}.$$

Полная мощность цепи: $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{384^2 + (-17,6)^2} = 385 \text{ ВА}.$

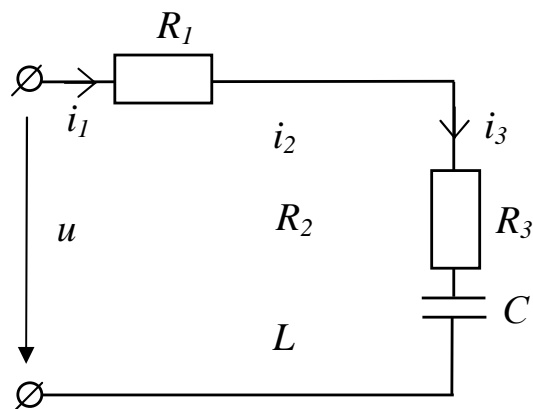


Рисунок 24.5 – Схема электрической цепи к задаче 24.9

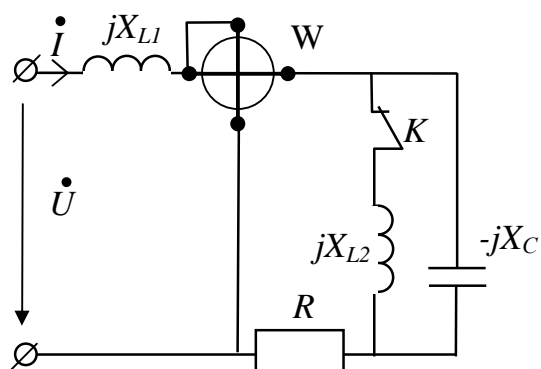


Рисунок 24.6 – Схема электрической цепи к задаче 24.10

Задача 24.10 Определить показание ваттметра W в электрической цепи (рис. 24.6) при замкнутом и разомкнутом выключателе S . Напряжение источника питания U , активное R и реактивные X_{L1} , X_{L2} и X_C сопротивления заданы в таблице 24.9.

Таблица 24.9

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U, В$	100	100	110	110	120	120	130	130	90	90	90
$R, Ом$	5	4	3	6	5	4	7	6	5	4	3
$X_{L1}, Ом$	5	5	4	4	6	6	5	5	4	4	6
$X_{L2}, Ом$	5	4	3	6	7	5	7	8	5	5	4
$X_C, Ом$	5	5	4	4	6	6	5	6	5	4	3

Решение задачи для варианта К.

В этом случае в электрической цепи происходит резонанс напряжений. Полное сопротивление цепи при разомкнутом выключателе:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_{L1} - X_C)^2} = \sqrt{5^2 + (5 - 5)^2} = 5 \text{ Ом.}$$

Ток в цепи при разомкнутом выключателе: $I = U/Z = 100/5 = 20 \text{ А}$. Показание ваттметра в этом случае: $P = R \cdot I^2 = 5 \cdot 20^2 = 2000 \text{ Вт} = 2 \text{ кВт}$.

Показание ваттметра при замкнутом выключателе: $P = R \cdot I^2 = 5 \cdot 0 = 0 \text{ Вт}$, поскольку на параллельном участке имеет место резонанс токов, и ток в цепи резистора R не протекает.

25 ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Задача 25.1 К трехфазному генератору подключены симметричный приемник электрической энергии (рис. 25.1). Определить фазное напряжение генератора, тока, фазное и линейное напряжения приемника, падение напряжения в линейных проводах, мощность приемника. Построить век-

торную диаграмму напряжений и токов. В таблице 25.1 приведены исходные данные для решения задачи: линейное напряжение генератора $U_{\text{л}}$, сопротивление проводов $\underline{Z}_{\text{np}} = R_{\text{np}} + jX_{\text{np}}$, сопротивление приемника $\underline{Z} = R + jX$.

Таблица 25.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{л}}, \text{В}$	220	220	220	220	220	220	380	380	380	380	380
$R_{\text{np}}, \text{Ом}$	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,8	0,8	1	1,2	1,2
$X_{\text{np}}, \text{Ом}$	1	1,2	1,4	1,2	1,4	1,2	1,2	1,4	1,2	1,0	1,4
$R, \text{Ом}$	10	12	12	12	10	14	18	20	22	22	24
$X, \text{Ом}$	6	6	8	6	8	8	10	12	14	16	16

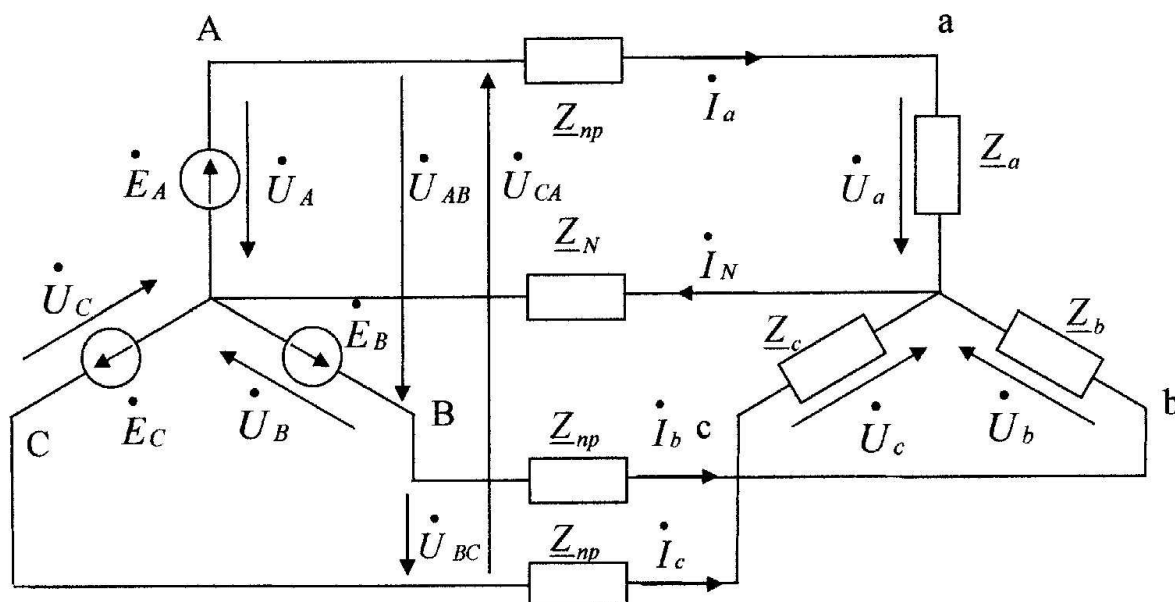


Рисунок 25.1 – Схема цепи к задаче 25.1

Решение задачи для варианта К.

Задачу решаем методом комплексных чисел.

Режим работы трехфазной цепи симметричный, поэтому напряжение между нейтральными точками $U_{\text{н}} = 0$.

При симметричной системе линейных напряжений генератора фазное напряжение равно

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В.}$$

Система комплексных фазных напряжений генератора, если принять напряжение \dot{U}_A чисто действительным:

$$\dot{U}_A = 127, \quad \dot{U}_B = 127e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_C = 127e^{j120^\circ}.$$

Комплексные фазные сопротивления и проводимости

$$\underline{Z}_\phi = \underline{Z} + \underline{Z}_{np} = (10 + j6) + (0,5 + j1) = 10,5 + j7 = 12,6e^{j34^0},$$

$$\underline{Y}_\phi = \frac{1}{\underline{Z}_\phi} = \frac{1}{12,6e^{j34^0}} = 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-j34^0} = (6,6 - j4,4) \cdot 10^{-2}.$$

Вследствие того, что системы фазных и линейных напряжений генератора и приемника симметричные, трехфазные системы токов, фазных и линейных напряжений приемника также являются симметричными.

Фазные тока приемника:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a \cdot \underline{Y}_a = 127 \cdot 7,9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-j34^0} = 10 \cdot e^{-j34^0},$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_a \cdot e^{-j120^0} = 10 \cdot e^{-j154^0}, \quad \dot{I}_c = \dot{I}_a \cdot e^{j120^0} = 10 \cdot e^{j86^0}.$$

Действующие значения фазных токов $I_a = I_b = I_c = 10$ А.

Система фазных напряжений приемника:

$$\dot{U}_a = \dot{I}_a \cdot \underline{Z}_a = 10 \cdot e^{-j34^0} (10 + j6) = 10 \cdot e^{-j34^0} \cdot 11,7 \cdot e^{j31^0} = 117 \cdot e^{-j3^0};$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_a \cdot e^{-j120^0} = 117 \cdot e^{-j123^0}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_a \cdot e^{j120^0} = 117 \cdot e^{j117^0}.$$

Действующие значения фазных напряжений приемника

$$U_a = U_b = U_c = 117 \text{ В.}$$

Линейные напряжения на приемнике:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b = 117 \cdot e^{-j3^0} - 117 \cdot e^{-j123^0} = 116,8 - j6,1 - (64,8 - j98,1) = \\ &= 180 + j92 = 202 \cdot e^{j27^0}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{-j120^0} = 202 \cdot e^{j27^0} \cdot e^{-j120^0} = 202 \cdot e^{-j93^0};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{ab} \cdot e^{j120^0} = 202 \cdot e^{j27^0} \cdot e^{j120^0} = 202 \cdot e^{j147^0}.$$

Падение напряжений в линейных проводах:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_a &= \dot{I}_a \cdot \underline{Z}_{np} = 10 \cdot e^{-j34^0} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{-j34^0} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^0} = 11,2 \cdot e^{j29^0}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_b &= \dot{I}_b \cdot \underline{Z}_{np} = 10 \cdot e^{-j154^0} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{-j154^0} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^0} = 11,2 \cdot e^{-j91^0}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_c &= \dot{I}_c \cdot \underline{Z}_{np} = 10 \cdot e^{j86^0} \cdot (0,5 + j1) = \\ &= 10 \cdot e^{j86^0} \cdot 1,12 \cdot e^{j63^0} = 11,2 \cdot e^{j149^0}. \end{aligned}$$

Фазные полная, активная и реактивная мощности приемника:

$$\underline{S}_\phi = \underline{S}_a = \underline{S}_b = \underline{S}_c = \dot{U}_a \cdot \dot{I}_a^* = 117 \cdot e^{-j3^0} \cdot 10 \cdot e^{j34^0} = 1170 \cdot e^{j31^0} = 1003 + j603;$$

$$S_\phi = 1170 \text{ ВА}; \quad P_\phi = 1003 \text{ Вт}; \quad Q_\phi = 603 \text{ вар.}$$

Полная, активная и реактивная мощности приемника:

$$\underline{S} = \sum \underline{S}_\phi = 3 \sum \underline{S}_\phi = 3510 \cdot e^{j51^0} = 3010 + j1810.$$

$$S = 3510 \text{ ВА}; \quad P = 3010 \text{ Вт}; \quad Q = 1810 \text{ вар.}$$

Векторная диаграмма напряжений и токов приведена на рисунке 25.2.

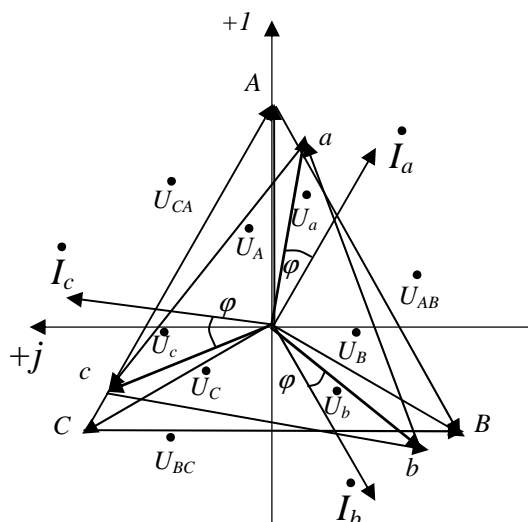


Рисунок 25.2 – Векторная диаграмма токов и напряжений к задаче 25.1

Задача 25.2 Трехфазный потребитель электроэнергии с активными и реактивными сопротивлениями $R_{ab}, R_{bc}, R_{ca}, X_{ab}, X_{bc}, X_{ca}$, соединенными «треугольником» (рис. 25.3), подключен к трехфазной сети с линейным напряжением $U_{\text{л}}$ при симметричном питании. Определить фазные $I_{\text{ф}}$ и линейные $I_{\text{л}}$ токи, активную P , реактивную Q и полную S мощности каждой фазы и всей электрической цепи. Построить векторную диаграмму токов и напряжений. Исходные данные приведены в таблице 25.2.

Таблица 25.2

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{л}}, \text{В}$	220	220	220	220	127	127	127	127	100	100	100
$R_{ab}, \text{Ом}$	10	12	14	10	10	14	14	10	8	10	10
$X_{ab}, \text{Ом}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{bc}, \text{Ом}$	5	8	10	8	5	10	8	12	12	8	10
$X_{bc}, \text{Ом}$	5	8	10	8	5	10	8	12	12	8	10
$R_{ca}, \text{Ом}$	5	8	10	10	5	10	10	12	12	8	10
$X_{ca}, \text{Ом}$	5	8	10	10	5	10	10	12	12	8	10

Решение задачи для варианта К.

Фазные токи потребителя:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{U_{ab}}{R_{ab}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А};$$

$$I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{U_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = \frac{220}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 31,11 \text{ А};$$

$$I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{U_{ca}}{\sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2}} = \frac{220}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 31,11 \text{ А}.$$

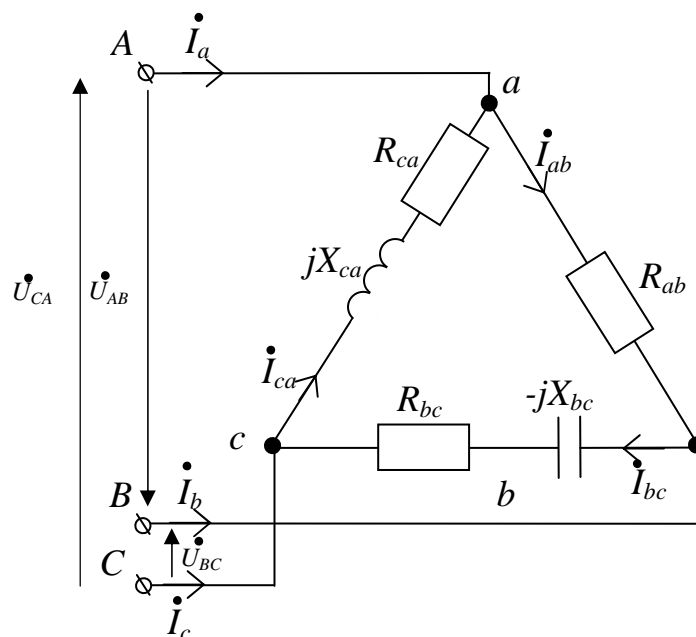


Рисунок 25.3 – Схема цепи к задаче 25.2

Векторная диаграмма токов и напряжений с учетом характера нагрузки показана на рисунке 25.4.

Активные составу фазных токов:

$$I'_{ab} = I_{ab} \cos \varphi_{ab} = I_{ab} \frac{R_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} \frac{R_{ab}}{\sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}} = 22 \frac{10}{\sqrt{10^2 + 0}} = 22 \text{ A};$$

$$I'_{bc} = I_{bc} \cdot \cos \varphi_{bc} = I_{bc} \frac{R_{bc}}{Z_{bc}} = I_{bc} \frac{R_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ A};$$

$$I'_{ca} = I_{ca} \cdot \cos \varphi_{ca} = I_{ca} \frac{R_{ca}}{Z_{ca}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ A}.$$

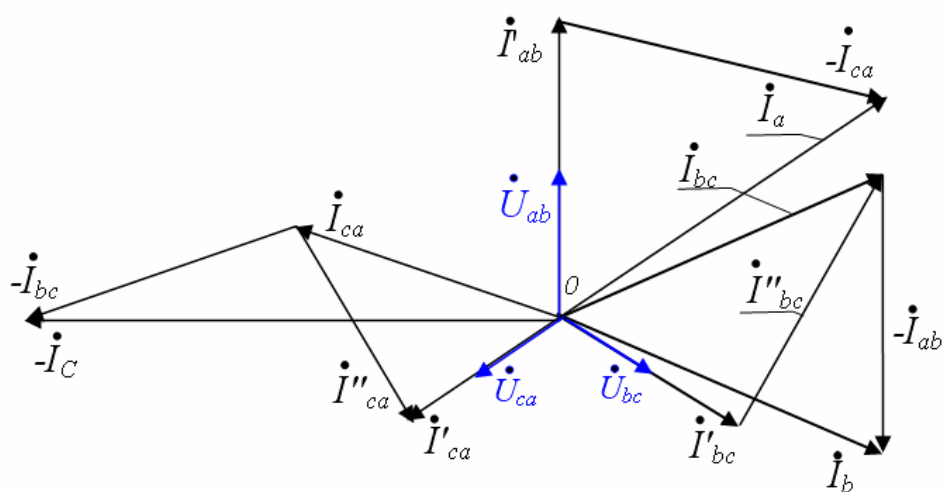


Рисунок 25.4 – Векторная диаграмма токов и напряжений к задаче 25.2

Реактивные составляющие фазных токов:

$$I_{ab}'' = I_{ab} \cdot \sin \varphi_{ab} = I_{ab} \frac{X_{ab}}{Z_{ab}} = I_{ab} \frac{X_{ab}}{\sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}} = 22 \frac{0}{\sqrt{5^2 + 0}} = 0;$$

$$I_{bc}'' = I_{bc} \cdot \sin \varphi_{bc} = I_{bc} \frac{X_{bc}}{Z_{bc}} = I_{bc} \frac{X_{bc}}{\sqrt{R_{bc}^2 + X_{bc}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ А};$$

$$I_{ca}'' = I_{ca} \cdot \sin \varphi_{ac} = I_{ca} \frac{X_{ca}}{Z_{ca}} = I_{ca} \frac{X_{ca}}{\sqrt{R_{ca}^2 + X_{ca}^2}} = 31,11 \frac{5}{\sqrt{5^2 + 5^2}} = 22 \text{ А}.$$

Линейные токи потребителя электроэнергии определяем по векторной диаграмме (рис. 25.4):

Активные мощности фаз потребителя:

$$P_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ Вт};$$

$$P_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ Вт};$$

$$P_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ Вт}.$$

Реактивные мощности фаз потребителя:

$$Q_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}'' = 220 \cdot 0 = 0;$$

$$Q_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc}'' = 220 \cdot 22 = -4840 \text{ ВАр};$$

$$Q_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca}'' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ ВАр}.$$

Полные мощности фаз потребителя:

$$S_{ab} = P_{ab} = U_{ab} \cdot I_{ab}' = 220 \cdot 22 = 4840 \text{ ВА};$$

$$S_{bc} = U_{bc} \cdot I_{bc} = 220 \cdot 31,11 = 6844,2 \text{ ВА};$$

$$S_{ca} = U_{ca} \cdot I_{ca} = 220 \cdot 31,11 = 6844,2 \text{ ВА}.$$

Мощности всей цепи:

активная $P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 4840 + 4840 + 4840 = 14520 \text{ Вт};$

реактивная $Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = 0 - 4840 + 4840 = 0 \text{ вар};$

полная $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{14520^2 + 0^2} = 14520 \text{ ВА} = 14,52 \text{ кВА}.$

26 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Задача 26.1 По данным таблицы 26.1. определить наибольшую абсолютную и относительную погрешности результатов измерения напряжения вольтметром класса точности K_T с верхней границей измерения U_{\max} , если показание прибора U_x , В. Найти наименьшее значение напряжения, которое можно измерять данным вольтметром при наибольшей допустимой ошибке измерения $\pm 10\%$.

Таблица 26.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K_T	2,5	1,5	1,0	0,5	2,5	1,5	1,0	0,5	0,2	0,2	1,0
$U_{\max}, \text{В}$	150	300	150	150	300	150	150	300	100	150	300
$U_x, \text{В}$	90	210	110	80	250	60	120	240	60	70	220

Решение задачи для варианта К.

Поскольку класс точности вольтметра, задан в виде числа 2,5 и определяется наибольшей приведенной погрешностью, наибольшую абсолютную ошибку определим по соотношению (8.4):

$$\Delta X = \frac{\gamma_m \cdot X_H}{100} = \pm \frac{2,5 \cdot 150}{100} = \pm 3,75 \text{ В.}$$

Наибольшую относительную погрешность измерения определим по соотношению (8.2):

$$\delta = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% = \frac{\pm 3,75 \cdot 100\%}{90} = \pm 4,17\%.$$

Наименьшее значение напряжения, которое может быть измерено данным вольтметром при наибольшей допустимой погрешности $\pm 10\%$, найдем, пользуясь соотношением (8.5):

$$X = \frac{\gamma_m \cdot X_H}{\delta} = \frac{2,5 \cdot 150}{10} = 37,5 \text{ В.}$$

Задача 26.2 Цифровым вольтметром класса точности c/d измерено напряжение U_x на пределе измерения U_{\max} . Определить наибольшую абсолютную и относительную погрешности измерения. Записать результат с полученной ошибкой. Исходные данные приведены в таблице 26.2.

Таблица 26.2

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
c/d	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,2/ 0,1	0,5/ 0,2	0,5/ 0,2	0,5/ 0,2	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0	1,5/ 1,0
$U_{\max}, \text{В}$	99,99	100	100	150	150	150	150	300	300	300	300
$U_x, \text{В}$	50,2	64,8	78,4	110	69	135	48,3	179	246	261	285

Решение задачи для варианта К.

Наибольшая относительная погрешность измерения прибором, класс точности которого задан в виде соотношения c/d , определяется по соотношению (8.6):

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{U_H}{U} \right) - 1 \right] \% = \pm \left[0,2 + 0,1 \left(\frac{99,99}{50,2} - 1 \right) \right] \% = \pm 0,299\%.$$

Наибольшая абсолютная погрешность измерения определяется по соотношению (8.2)

$$\Delta U = \frac{\delta \cdot U}{100} = \pm \frac{0,299 \cdot 50,20}{100} = \pm 0,1501 \text{ В.}$$

Результат измерения с указанной погрешностью будет иметь вид

$$U_0 = U - \Delta U = 50,20 \pm 0,15 \text{ В.}$$

Задача 26.3 Предел измерения тока амперметром с шунтом равен I_H . Шунт выполнен на основе магнитоэлектрического миллиамперметра с сопротивлением $R_{пр}$, пределом измерений $I_{пр.маx}$ и шкалой α_H делений. Определить сопротивление шунта $R_{ш}$ и ток в цепи I , к которому подключен амперметр, если его стрелка отклонилась на α_X делений (рис. 7.10). Исходные данные приведены в таблице 26.3.

Таблица 26.3

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_H, \text{А}$	2,5	2,5	2,5	5	5	5	5	10	10	10	10
$R_{пр}, \text{Ом}$	0,4	0,6	0,4	1	1	1	1	2	2	2	2
$I_{пр.маx}, \text{Ма}$	500	250	500	250	250	500	500	250	250	500	500
$\alpha_H, \text{делений}$	50	50	100	50	50	100	100	75	75	150	150
$\alpha_X, \text{делений}$	40	30	60	40	45	60	80	50	60	80	120

Решение задачи для варианта К.

Коэффициент шунтирования (7.13) $p = \frac{I_H}{I_{пр.маx}} = \frac{2,5}{500 \cdot 10^{-3}} = 5.$

Сопротивление шунта (7.14) $R_{ш} = \frac{R_{пр}}{p-1} = \frac{0,4}{5-1} = 0,1 \text{ Ом.}$

Постоянная амперметра с шунтом $C_i = \frac{I_H}{\alpha_H} = \frac{2,5}{50} = 0,05 \text{ А/дел.}$

Ток в цепи $I = C_i \cdot \alpha_X = 0,05 \cdot 40 = 2 \text{ А.}$

Задача 26.4 Двухпределный миллиамперметр (рис. 26.1) выполнен на основе магнитоэлектрического микроамперметра с током полного отклонения $I_{пр.маx}$ и сопротивлением $R_{пр}$. Определить сопротивления резисторов R_1 и R_2 двухпределного шунта, если пределы измерения миллиамперметра $I_{1.маx}$ и $I_{2.маx}$. Исходные данные приведены в таблице 26.4.

Таблица 26.4

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_{np.max}, \text{мкА}$	100	100	100	100	150	150	150	150	300	300	300
$R_{np}, \text{Ом}$	2000	2400	2400	2000	2000	2400	2400	2000	2000	2400	2400
$I_{1.max}, \text{мА}$	10	50	75	50	75	50	75	10	50	75	75
$I_{2.max}, \text{мА}$	75	100	150	100	150	100	150	75	150	250	300

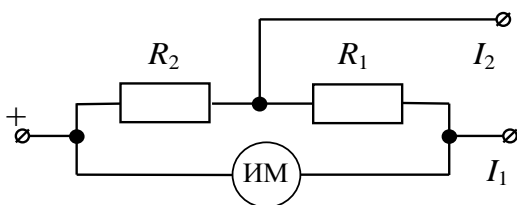


Рисунок 26.1 – Схема к задаче 26.4

Решение задачи для варианта К.
Коэффициенты шунтирования (7.13):

$$p_1 = \frac{I_{1.max}}{I_{np.max}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 100;$$

$$p_2 = \frac{I_{2.max}}{I_{np.max}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 750.$$

Используя (7.14) запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = \frac{R_{np}}{p_1 - 1}; \\ R_2 = \frac{R_1 + R_{np}}{p_2 - 1}, \end{cases}$$

из которой найдем $R_2 = \frac{R_{np} \cdot p_1}{(p_1 - 1) \cdot p_2} = \frac{2000 \cdot 100}{(100 - 1) \cdot 750} = 2,69 \text{ Ом.}$

Тогда $R_1 = \frac{R_{np}}{p_1 - 1} - R_2 = \frac{2000}{100 - 1} - 2,69 = 17,51 \text{ Ом.}$

27 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Задача 27.1 Определить коэффициент трансформации n трансформатора, количество витков w_1 первичной обмотки при числе витков вторичной обмотки w_2 , а также номинальные тока $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$ в обмотках однофазного трансформатора с номинальной мощностью $S_{1ном}$, включенного в питающую сеть с напряжением $U_{1ном} = 127 \text{ В}$. Напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе составляет U_{20} . Исходные данные для расчета приведены в таблице 27.1.

Таблица 27.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_2 , ВИТКОВ	40	50	60	70	80	80	70	60	60	40	50
$S_{1ном}$, кВА	3	3,6	4	6	10	5	6,6	6	4,4	3,8	4,2
$U_{1ном}$, В	127	127	220	220	220	127	220	220	127	127	127
U_{20} , В	60	100	40	60	80	40	40	60	50	40	40

Решение задачи для варианта К.

Коэффициент трансформации трансформатора

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{127}{60} = 2,11.$$

Поскольку $U_{20} = E_2$, при холостом ходе трансформатора падение напряжения на первичной обмотке незначительное, поэтому приблизительно $U_1 \cong E_1$. Количество витков первичной обмотки:

$$w_1 = n \cdot w_2 = 2,11 \cdot 40 = 84,4.$$

Номинальный ток первичной обмотки, считая полные мощности обмоток равными $S_1 \cong S_2$, составляют:

$$I_{1ном} = \frac{S_{1ном}}{U_{1ном}} = \frac{3 \cdot 1000}{127} = 23,6 \text{ А.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки трансформатора (с учетом $U_{2ном} = U_{20}$)

$$I_{2ном} = \frac{S_{1ном}}{U_{20}} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ А.}$$

Задача 27.2 Определить коэффициент трансформации n трехфазного трансформатора и номинальные действующие значения первичного и вторичного напряжений фазных $U_{1ф.ном}$, $U_{2ф.ном}$ и линейных $U_{2л.ном}$, при соединении обмоток по схемам «звезда-звезда» и «звезда-треугольник». Первичная обмотка имеет количество витков на фазу w_1 , вторичная - w_2 . Номинальное линейное напряжение первичной обмотки $U_{1л.ном}$. Исходные данные для расчета приведены в таблица 27.2.

Таблица 27.2

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
w_1 , витков	2002	1980	1200	1600	1400	2300	2000	1900	1800	1700	1980
w_2 , витков	134	126	100	106	94	140	130	127	120	112	126
$U_{1л.ном}$, В	6000	6000	3300	3300	3300	10000	10000	6000	6000	6000	6000

Решение задачи для варианта К.

Коэффициент трансформации фазных напряжений

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{2002}{134} = 15.$$

Номинальное первичное фазное напряжение трансформатора

$$U_{1ф.ном} = \frac{U_{1л.ном}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{1,73} = 3470 \text{ В.}$$

Номинальные вторичные напряжения при соединении обмоток трансформатора по схеме «звезда-звезда»:

линейное $U_{2л.ном} = U_{1л.ном} / n = 6000 / 15 = 400 \text{ В;}$

$$U_{2\phi.\text{ном}} = U_{2\text{л.ном}} / \sqrt{3} = 400 / 1,73 = 230 \text{ В.}$$

Коэффициенты трансформации трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда-звезда»:

$$n_{Y..л} = U_{1\text{л.ном}} / U_{2\text{л.ном}} = 6000 / 400 = 15 ;$$

$$n_{Y..ф} = U_{1\phi.\text{ном}} / U_{2\phi.\text{ном}} = 3479 / 230 = 15 .$$

Коэффициенты трансформации трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда-треугольник»:

$$n_{\Delta..л} = U_{1\text{л.ном}} / U_{2\text{л.ном}} = 6000 / 230 = 26 ;$$

$$n_{\Delta..ф} = U_{1\phi.\text{ном}} / U_{2\phi.\text{ном}} = 3479 / 230 = 15 .$$

Задача 27.3 Трехфазный трансформатор имеет мощность $S_{\text{ном}}$, номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток $U_{1.\text{ном}}$, $U_{2.\text{ном}}$ при частоте сети $f = 50$ Гц. Потери холостого хода при номинальном напряжении составляют $P_{\text{хх}} = 180$ Вт, потери короткого замыкания – $P_{\text{кз}} = 1000$ Вт. Определить КПД трансформатора при заданных $\cos\varphi_2$ и коэффициенте загрузки β , изменяющимся в диапазоне от 0,4 до 1. Построить зависимость КПД от коэффициента нагрузки. Исходные данные для расчета приведены в таблице 27.3.

Таблица 27.3

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{\text{ном}}, \text{кВА}$	40	63	25	100	100	160	160	250	250	400	400
$U_{1\text{л.ном}}, \text{кВ}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2\text{л.ном}}, \text{кВ}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$P_{\text{хх}}, \text{кВт}$	0,18	0,24	0,14	0,49	0,49	0,73	0,73	1,05	1,05	1,45	1,45
$P_{\text{кз}}, \text{кВт}$	1,0	1,4	0,8	1,97	1,97	2,65	2,65	3,7	3,7	5,5	5,5
$\cos\varphi_2$	0,9	0,8	0,84	0,74	0,86	0,76	0,88	0,73	0,87	0,68	0,84

Решение задачи для варианта К.

Для определения КПД трансформатора воспользуемся соотношением (9.16). КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = 1,0$

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2 + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{мн}} \cdot \beta^2} = \frac{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_2 + P_{\text{хх}} + P_{\text{кз}} \cdot \beta^2} =$$

$$= \frac{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9}{1,0 \cdot 40 \cdot 0,9 + 0,18 + 1 \cdot 1^2} = 0,968.$$

Результаты расчета для других значений коэффициента нагрузки приведены в таблице 27.4. На рисунке 27.1 построена зависимость КПД от коэффициента нагрузки трансформатора.

Таблица 27.4

β	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
η	0,949	0,970	0,975	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968

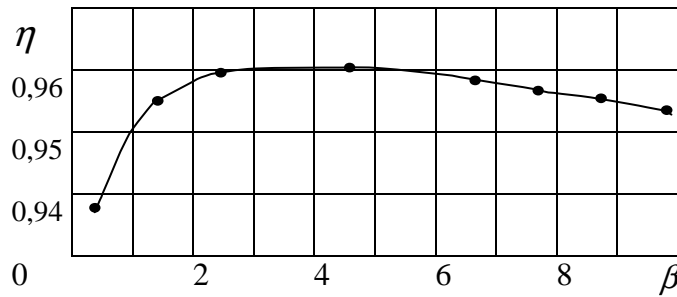


Рисунок 27.1 – Расчетная зависимость КПД от β

Задача 27.4 Определить параметры упрощенной Г-образной схемы замещения трансформатора (рис. 9.4, б) с номинальной мощностью $S_{1\text{ном}}$. Обмотки трансформатора соединены по схеме «звезда», номинальные линейные напряжения первичной и вторичной обмоток $U_{1\text{л.ном}}$, $U_{2\text{л.ном}}$, ток холостого хода $I_{\text{хх}} = \% \cdot I_{\text{н}}$, мощность холостого хода $P_{\text{хх}}$, напряжение короткого замыкания $U_{\text{кз}}$, мощность короткого замыкания $P_{\text{кз}}$. Исходные данные для расчета приведены в таблице 27.5.

Таблица 27.5

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{1\text{ном}}$, кВА	50	63	25	100	100	160	160	250	250	400	400
$U_{1\text{л.ном}}$, кВ	6	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{2\text{л.ном}}$, кВ	0,53	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$I_{\text{хх}}$, %	7	6,3	8	2,6	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3	2,1	2,1
$P_{\text{хх}}$, кВт	0,35	0,24	0,14	0,49	0,49	0,73	0,73	1,05	1,05	1,45	1,45
$U_{\text{кз}}$, %	1,0	1,4	0,8	1,97	1,97	2,65	2,65	3,7	3,7	5,5	5,5
$P_{\text{кз}}$, кВт	0,325	0,8	0,84	0,74	0,86	0,76	0,88	0,73	0,87	0,68	0,84

Решение задачи для варианта К.

Номинальные фазные (линейные) токи обмоток трансформатора, считая $S_{1\text{ном}} \approx S_{2\text{ном}}$:

$$I_{1\text{н}} = \frac{S_{1\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{н}}} = \frac{50 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 6000} = 4,82 \text{ А},$$

$$I_{2\text{н}} = \frac{S_{1\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{н}}} = \frac{50 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 525} = 55 \text{ А}.$$

Номинальные фазные напряжения трансформатора

$$U_{1\text{ф.ном}} = U_{1\text{л.ном}} / \sqrt{3} = 6000 / 1,73 = 3460 \text{ В},$$

$$U_{2\text{ф.ном}} = U_{2\text{л.ном}} / \sqrt{3} = 525 / 1,73 = 303 \text{ В}.$$

Ток холостого хода трансформатора

$$I_{\text{хх}} = \frac{7\%}{100} \cdot I_{1\text{ном}} = 0,07 \cdot 4,82 = 0,338 \text{ А}.$$

Активное сопротивление намагничивающей цепи Г-образной схемы замещения

$$R_0 = \frac{P_{xx}}{3 \cdot I_{xx}^2} = \frac{350}{3 \cdot 0,338^2} = 1040 \text{ Ом.}$$

Сопротивления намагничивающей цепи:

полное $Z_0 = U_{1\phi,ном} / I_{xx} = 3460 / 0,338 = 10250 \text{ Ом;}$

индуктивное $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{10250^2 - 1040^2} = 9800 \text{ Ом.}$

Сопротивление короткого замыкания трансформатора:

полное $Z_k = U_k \frac{U_{1,ном}^2}{S_{ном}} = 0,055 \frac{6000^2}{50000} = 39,6 \text{ Ом;}$

активное $R_k = R_1 + R_2' = \frac{P_{xx}}{3 \cdot I_{1ном}^2} = \frac{325}{3 \cdot 4,82^2} = 4 \text{ Ом;}$

реактивное $X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{39,6^2 - 4^2} = 39,5 \text{ Ом.}$

28 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задача 28.1 Машина постоянного тока в режиме двигателя имеет следующие номинальные данные: P_n ; U_n ; I_n ; $R_{я}$; $I_{зб}$; n_n .

Определить необходимую скорость вращения якоря МПС, работающей в режиме генератора с напряжением $U_{г}$. Вычислить номинальную мощность генератора, если насыщение стали и нагрев принять такими же, как у двигателя. Исходные данные приведены в таблице 28.1.

Таблица 28.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_n , кВт	11	13	15	18	16	14	12	10	12	14	16
U_n , В	220	230	240	230	220	230	240	230	220	230	240
n_n , об/мин	1000	960	900	840	800	1100	1180	960	900	860	800
I_n , А	62	64	66	68	66	64	62	60	62	64	66
$R_{я}$, Ом	0,09	0,1	0,14	0,16	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,13	0,15
$I_{зб}$, А	3	3,4	3,6	3,8	4	3,8	3,6	3	3,2	3,4	3,6
$U_{г}$, В	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230

Решение задачи для варианта К.

Определяем ток якоря двигателя и генератора

$$I_{я,дв} = I_n - I_{зб} = 62 - 3 = 59 \text{ А} = I_{н.г.}$$

Вычисляем ЭДС двигателя и генератора без учета падения напряжения в щеточном контакте:

$$E_{дв} = U_n - I_{я,дв} \cdot R_{я} = 220 - 59 \cdot 0,09 = 214,7 \text{ В;}$$

$$E_{г} = U_{г} + I_{яг} \cdot R_{я} = 230 + 59 \cdot 0,09 = 235,3 \text{ В.}$$

Скорость вращения якоря генератора определяем из соотношения

$$\frac{E_{\Gamma}}{E_{ДВ}} = \frac{c \cdot n_{\Gamma} \cdot \Phi_{\Gamma}}{c \cdot n_{ДВ} \cdot \Phi_{ДВ}} = \frac{n_{\Gamma}}{n_{ДВ}},$$

поскольку по условию $\Phi_{\Gamma} = \Phi_{ДВ}$,

$$n_{\Gamma} = \frac{E_{\Gamma}}{E_{ДВ}} n_{ДВ} = \frac{235,3}{214,7} 1000 = 1096 \text{ об/мин.}$$

Если учесть падение напряжения на щеточном контакте, например при $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$, тогда

$$E'_{ДВ} = U_{н} - I_{яДВ} \cdot R_{я} - \Delta U_{щ} = 214,7 - 2 = 212,7 \text{ В},$$

$$E'_{\Gamma} = U_{\Gamma} + I_{я\Gamma} \cdot R_{я} + \Delta U_{щ} = 235,3 + 2 = 237,3 \text{ В},$$

и скорость вращения должна быть

$$n_{\Gamma} = \frac{E'_{\Gamma}}{E'_{ДВ}} n_{ДВ} = \frac{237,3}{212,7} 1000 = 1116 \text{ об/мин.}$$

Находим номинальный ток и номинальную мощность:

$$I_{н.Г} = I_{я.Г} - I_{зб} = 59 - 3 = 56 \text{ А},$$

$$P_{нГ} = U_{\Gamma} \cdot I_{нГ} = 230 \cdot 56 = 12880 \text{ Вт} = 12,9 \text{ кВт.}$$

Задача 28.2 Определить скорость вращения якоря генератора с $P_{н} = 16,5 \text{ кВт}$, $U_{н} = 230 \text{ В}$, $n_{н.Г} = 1460 \text{ об/мин}$, $R_{я} = 0,18 \text{ Ом}$, $R_{зб} = 82 \text{ Ом}$ при работе в режиме двигателя с $U_{ДВ} = 220 \text{ В}$, если насыщение стали и нагрев двигателя принять такими же, как у генератора. Вычислить электромагнитную мощность двигателя.

Исходные данные приведены в таблице 28.2.

Таблица 28.2

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{нГ}, \text{ кВт}$	16,5	18	20	22	21	19	17	15	16	18	20
$U_{н.Г}, \text{ В}$	230	240	230	240	230	240	230	240	230	240	230
$n_{н.Г}, \text{ об/мин}$	1460	1400	1540	1500	1460	1400	1540	1600	1500	1460	1400
$R_{я}, \text{ Ом}$	0,18	0,2	0,22	0,21	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16	0,18	0,2
$R_{зб}, \text{ Ом}$	82	84	86	85	83	81	80	82	84	85	83
$U_{ДВ}, \text{ В}$	220	220	220	230	210	220	210	220	210	220	220

Решение задачи для варианта К.

Находим ток якоря генератора и двигателя:

$$I_{я.Г} = I_{н} + I_{зб} = P_{нГ}/U_{н.Г} + U_{н}/R_{зб} = 16500/230 + 230/82 = 72 + 2,8 = 74,8 \text{ А};$$

$$I_{я.ДВ} = I_{я.Г} \text{ (по условию задачи).}$$

Ток, потребленный двигателем из сети, равняется

$$I_{ДВ} = I_{я.ДВ} + I_{зб} = 74,8 + 2,8 = 77,6 \text{ А.}$$

Вычисляем ЭДС генератора и двигателя:

$$E_{\Gamma} = U_{н.Г} + I_{я.Г} \cdot R_{я} = 230 + 74,8 \cdot 0,18 = 243,5 \text{ В};$$

$$E_{ДВ} = U_{ДВ} - I_{я.ДВ} \cdot R_{я} = 220 - 74,8 \cdot 0,18 = 206,5 \text{ В.}$$

Скорость обращения якоря двигателя находим из соотношения

$$n_{дв} = \frac{E_{дв}}{E_{г}} n_{н.г} = \frac{206,5}{243,5} 1460 = 1238 \text{ об/мин.}$$

Определяем электромагнитную мощность двигателя:

$$P_{ем} = E_{дв} \cdot I_{я.дв} = 206,5 \cdot 74,8 = 15446 \text{ Вт} = 15,5 \text{ кВт.}$$

Номинальная мощность двигателя будет немного меньше.

29 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Задача 29.1 Многополюсный двигатель при номинальной нагрузке работает со скольжением $s = 4\%$. Частота сети $f_1 = 50$ Гц. Определить скорость обращения двигателя. Исходные данные приведенные в таблице 29.1.

Таблица 29.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число полюсов	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4
$s, \%$	4	3,6	3,2	2,8	4,4	4,8	3,3	3,5	3,8	4,2	4,5
$f_1 = 50$ Гц.	50	60	50	60	50	60	50	60	50	60	50

Решение задачи для варианта К.

Число пар полюсов $p = 6/2 = 3$; синхронная скорость

$$n_1 = f_1 \cdot 60/p = 50 \cdot 60/3 = 1000 \text{ об/мин.}$$

Скорость вращения ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = 1000 \cdot (1 - 0,04) = 960 \text{ об/мин.}$$

Задача 29.2 Скорость вращения асинхронного двигателя при номинальной нагрузке составляет n_2 об/мин, при холостом ходе - $n_{хх}$ об/мин. Определить скольжение при нагрузке и холостом ходе; $f_1 = 50$ гц. Шкала частот вращения: 3000, 2200, 1600, 1500, 1000, 850, 800, 750, 650, 600 об/мин. Исходные данные приведены в таблице 29.2.

Таблица 29.2

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_{хх}, \text{ об/мин}$	2940	2160	1550	820	630	580	580	740	730	780	840
$n_2, \text{ об/мин}$	2850	2040	1320	740	560	510	490	680	660	690	760
$f_1 = 50$ Гц.	50	50	50	50	60	60	50	60	50	60	50

Решение задачи для варианта К.

Синхронная скорость для этого двигателя $n_1 = 3000$ об/мин (ближайшая большая). Скольжение при нагрузке

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 = \frac{3000 - 2850}{3000} 100 = 5\% ;$$

при холостом ходе

$$s = \frac{3000 - 2940}{3000} 100 = 2\% .$$

Задача 29.3 Двигатель с контактными кольцами включен в сеть с напряжением U_n , В. На разомкнутых кольцах ротора измеренное напряжение составило U_2 , В. Количество витков фазных обмоток статора – $w_I = 60$, обмоточный коэффициент – $k_I = 0,94$, обмоток ротора – $w_2 = 36$, $k_2 = 0,96$. Обмотки соединены «звездой». Частота сети f_1 Гц.

Определить поток, проходящий через полюса двигателя, и ЭДС статора E_1 . Исходные данные приведены в таблице 29.3.

Таблица 29.3

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U_n , В	380	380	220	220	400	400	400	390	390	380	380
U_2 , В	228	224	129	127	300	292	268	240	236	210	216
w_I , витков	60	60	54	54	66	68	70	64	62	62	60
k_I	0,94	0,92	0,94	0,92	0,95	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93
w_2 , витков	36	35	32	30	40	38	42	40	38	38	36
k_2	0,96	0,94	0,96	0,92	0,93	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,94
f_1 , Гц	50	50	50	50	60	60	60	60	50	50	50

Решение задачи для варианта К.

Фазная ЭДС неподвижного ротора

$$E_{2H} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{228}{1,73} = 132 \text{ В.}$$

Поток равен

$$\Phi = \frac{E_{2H}}{4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_2} = \frac{132}{4,44 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 0,96} = 0,0173 \text{ Вб.}$$

ЭДС статора

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_I \cdot k_I \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 0,94 \cdot 0,0173 = 216 \text{ В.}$$

Задача 29.4 Определить величину и фазу номинального тока ротора двигателя с контактными кольцами, при заданных E_{2H} , R_2 , X_{2H} и s_H .

Исходные данные приведены в таблице 29.4.

Таблица 29.4

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_{2H} , В	132	130	126	122	136	140	138	135	133	137	131
R_2 , Ом	0,24	0,22	0,2	0,2	0,25	0,27	0,26	0,25	0,23	0,27	0,22
X_{2H} , Ом	1,2	1,1	1,0	1,2	1,3	1,4	1,35	1,3	1,1	1,4	1,1
s_H	0,035	0,03	0,04	0,02	0,04	0,06	0,05	0,02	0,03	0,04	0,035

Решение задачи для варианта К.

$$I_{2H} = \frac{E_{2H} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s_H^2}} = \frac{132 \cdot 0,035}{\sqrt{0,24^2 + 1,2^2 \cdot 0,035^2}} = 19 \text{ А};$$

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_{2H} \cdot s_H}{R_2} = \frac{1,2 \cdot 0,035}{0,24} = 0,175; \quad \psi_2 = 9^\circ 55'.$$

Если при определении номинального тока ротора пренебречь индуктивным сопротивлением $X_2 = X_{2H} \cdot s$, получим

$$I_{2H} = \frac{E_{2H} \cdot s}{R_2} = \frac{132 \cdot 0,035}{0,24} = 19,2 \text{ А}.$$

Задача 29.5 Номинальная мощность двигателя P_H кВт, напряжение U_H В, КПД η_H , коэффициент мощности $\cos \varphi_H$, потери постоянные ΔP_C от P_H . Потери мощности в обмотках статора в номинальном режиме ΔP_{EC} от P_H . Определить потребляемый ток и электромагнитную мощность двигателя в номинальном режиме. Исходные данные приведены в таблице 29.5.

Таблица 29.5

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_H , кВт	10	11	7,5	7,5	5,5	5,5	4	4	3	2,2	2,2
U_H , В	380	380	380	380	380	380	380	220	220	220	220
η_H	0,88	0,9	0,78	0,84	0,86	0,88	0,86	0,85	0,84	0,84	0,82
$\cos \varphi_H$	0,87	0,84	0,87	0,86	0,85	0,84	0,8	0,84	0,82	0,8	0,76
ΔP_C	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05
ΔP_{EC}	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03

Решение задачи для варианта К.

Потребляемая мощность

$$P_1 = \frac{P_H}{\eta_H} = \sqrt{3} U_H \cdot I_H \cdot \cos \varphi_H.$$

Номинальный ток

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 20 \text{ А}.$$

Электромагнитная мощность в номинальном режиме

$$P_{EM} = P_1 - P_C - P_{EC} = P_H / \eta_H - 0,05 \cdot P_H - 0,03 \cdot P_H = 10 / 0,88 - 0,05 \cdot 10 - 0,03 \cdot 10 = 10,55 \text{ кВт}.$$

Задача 29.6 Асинхронный короткозамкнутый двигатель имеет следующие данные: номинальную мощность P_H , номинальное напряжение U_H , КПД η , $\cos \varphi = 0,89$, кратность пускового тока $k_T = I_{\Pi} / I_H = 7$, кратность пускового момента $k_M = M_{\Pi} / M_H = 1,3$, скорость вращения ротора n_2 . Определить пусковой момент и пусковой ток двигателя.

Исходные данные приведены в таблице 29.6.

Таблица 29.6

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_H , кВт	20	22	18,5	15	11	7,5	30	37	45	55	75
U_H , В	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
η_n , %	87,5	89	86,4	84	84	83	88	88	89	90	91
$\cos\varphi$	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,89	0,86	0,9	0,9	0,9
k_T	7	6,6	6,5	6,5	6,4	6,4	7	7	7	7	7
k_n	1,3	1,4	1,4	1,3	1,3	1,5	1,5	1,4	1,6	1,6	1,6
n_2 , об/мин	2930	2910	2940	2950	1440	1450	960	970	980	980	980

Решение задачи для варианта К.

Номинальный вращающий момент

$$M_H = 975 \cdot P_H / n_2 = 975 \cdot 20 / 2930 = 6,65 \text{ кГ}\cdot\text{м.}$$

Пусковой момент

$$M_n = M_H \cdot k_n = 6,65 \cdot 1,3 = 8,64 \text{ кГ}\cdot\text{м.}$$

Номинальный ток

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{20 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,875} = 39,6 \text{ А.}$$

Пусковой ток

$$I_n = I_H \cdot k_T = 39,6 \cdot 7 = 277 \text{ А.}$$

Задача 29.7 Как изменятся пусковой момент и ток двигателя, рассмотренного в задаче 29.6, если на время пуска напряжение снизить на 20%.

Решение задачи для варианта К.

Пусковой момент пропорционален U^2 , поэтому

$$M_{П1} = 0,8^2 \cdot M_{П} = 0,64 \cdot 8,64 = 5,5 \text{ кГ}\cdot\text{м,}$$

снижение составит 34%.

Пусковой ток можно считать пропорциональным напряжению U . Таким образом, он снизится на 20% и будет равен

$$I_{П1} = I_n \cdot 0,8 = 277 \cdot 0,8 = 221,6 \text{ А.}$$

30 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Задача 30.1 Электродвигатель нагружен постоянным моментом сопротивления M_c , не зависящим от скорости. Суммарный приведенный момент инерции J . Определить время разгона двигателя до номинальной скорости n_n из состояния покоя, если средний вращающий момент двигателя во время разгона M . Исходные данные приведены в таблице 30.1.

Таблица 30.1

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M_c , кГм	7	8	9	10	9	8	7	6	5	7	8
J , кГм·сек ²	0,3	0,4	0,5	0,25	0,34	0,44	0,52	0,48	0,4	0,3	0,4
n_n , об/мин	960	1200	1400	1600	1400	1300	1200	1100	1000	980	920
M , кГм	15	16	17	18	17	16	14	13	15	17	16

Решение задачи для варианта К.

Для определения времени разгона воспользуемся уравнением движения электропривода (14.13), из которого следует, что

$$dt = \frac{J}{M - M_{он}} d\omega.$$

Выразим время разгона

$$t = \int_{\omega=0}^{\omega_n} \frac{J}{M - M_{он}} d\omega = \frac{J}{M - M_{он}} \omega_n = \frac{J}{M_{дин}} \omega_n. \quad (30.1)$$

Среднее значение динамического момента на валу двигателя во время разгона определим по формуле

$$M_{дин} = M - M_{он} = 15 - 7 = 8 \text{ кГ} \cdot \text{м}.$$

Номинальное значение угловой скорости определим следующим образом:

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 960}{60} = 100,5 \text{ рад/с}.$$

Подставив значение ω_n в (30.1), получим время разгона

$$t = \frac{0,3}{8} \cdot 100,5 = 3,8 \text{ с}.$$

Задача 30.2 Определить приведенные к валу двигателя M момент статического сопротивления и момент инерции механизма подъемной лебедки с грузом (рис. 30.1). Известны: вес груза G , скорость подъема груза V , скорость вращения двигателя n , момент инерции двигателя J_d , момент инерции муфты и механизма лебедки $J_{мех}$, КПД лебедки $\eta_{леб}$. Исходные данные приведены в таблице 30.2.

Таблица 30.2

Параметр	Вариант задания										
	К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
G, кГ	1000	1100	1200	960	980	920	900	960	1000	1200	1000
V, м/мин	25	26	27	24	23	22	21	23	26	25	27
n, об/мин	730	760	800	840	800	760	730	700	750	770	800
J_d, кГм·с²	0,08	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06
J_{мех}, кГм·с²	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05
η_{леб}	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6

Решение задачи для варианта К.

Приведенный момент инерции элементов, перемещающихся поступательно, определяется из равенства

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2},$$

откуда

$$J = m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2.$$

Определим угловую скорость двигателя и массу груза

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 730}{60} = 76,4 \text{ рад/с}; \quad m = \frac{G}{g} = \frac{1000}{9,81} = 101,94 \text{ кг}.$$

Тогда момент инерции груза, который перемещается поступательно

$$J_n = 101,94 \cdot \left(\frac{25}{60 \cdot 76,4} \right)^2 = 0,0032 \text{ кГ} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2.$$

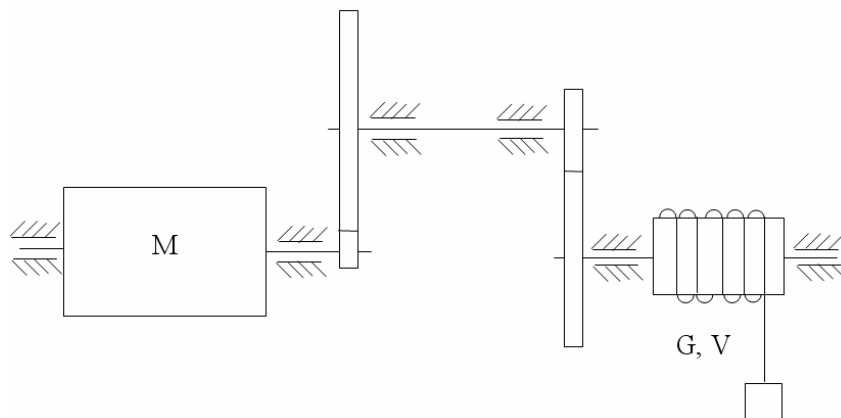


Рисунок 30.1 – Схема подъемного механизма

Суммарный приведенный момент инерции

$$J_{\Sigma} = J_d + J_m + J_n = 0,08 + 0,02 + 0,0032 = 0,1032 \text{ кГ} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2.$$

Приведенный статический момент сопротивления на валу двигателя согласно (13.9) равен

$$M_{ст} = G \cdot \rho / \eta.$$

Определим ρ по формуле

$$\rho = \frac{v}{\omega} = \frac{25}{76,4 \cdot 60} = 0,0055 \text{ м},$$

тогда

$$M_{ст} = \frac{1000 \cdot 0,0055}{0,8} = 6,9 \text{ кГ} \cdot \text{м}.$$

Задача 30.3 Механизм работает в продолжительном режиме по графику нагрузки. Выбрать для этого привода асинхронный короткозамкнутый двигатель серии АО. Скорость вращения n , продолжительность ступеней нагрузки t , и соответствующие величины момента нагрузки M , приведены в таблице 30.3.

Таблица 30.3

Параметр		Вариант задания										
		К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n , об/мин		970	800	800	900	900	1000	1000	950	950	1000	800
1 ступень	t , с	20	10	15	20	30	35	20	40	35	80	90
	M , кГМ	13	8	12	60	45	15	80	120	95	70	25
2 ступень	t , с	120	90	80	60	120	70	150	180	20	30	50
	M , кГМ	8	20	6	45	88	12	50	100	35	40	20
3 ступень	t , с	60	30	45	120	80	60	30	20	120	180	30
	M , кГМ	10	12	9	75	34	20	65	80	50	60	30

Решение задачи для варианта К.

На рисунке 30.2 показан график момента нагрузки. Определим эквивалентный момент нагрузки

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{13^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 120 + 10^2 \cdot 60}{20 + 120 + 60}} = 9,4 \text{ кГм}.$$

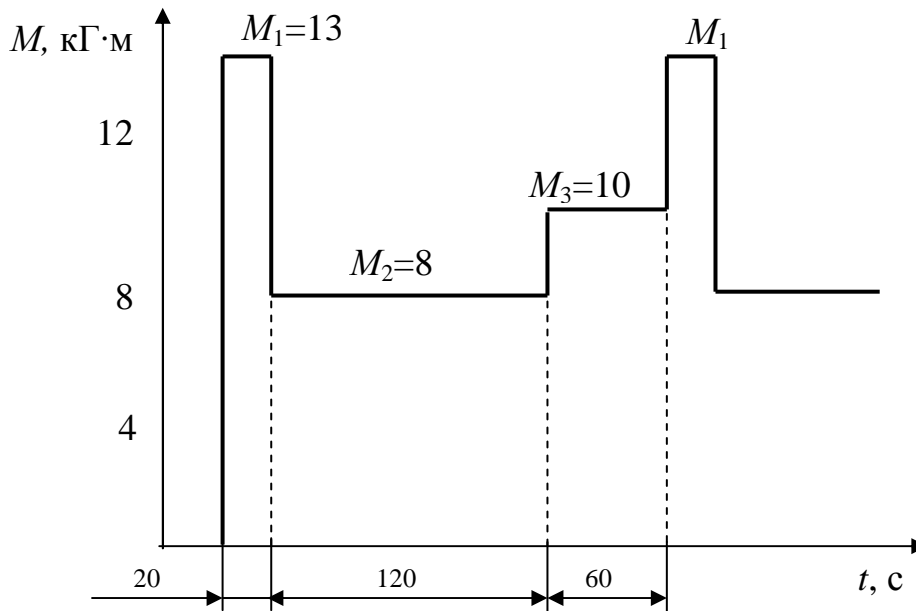


Рисунок 30.2 – График момента нагрузки

Эквивалентная мощность двигателя определяется по формуле

$$P_{\text{экв}} = M_{\text{экв}} \cdot \omega = M_{\text{экв}} \frac{\pi \cdot n}{30} = 9,4 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 970}{30} = 9300 \text{ Вт} = 9,3 \text{ кВт}.$$

Изменениями скорости двигателя при изменениях нагрузки пренебрегаем.

По каталогу принимаем двигатель АО63-6, $P_n = 10 \text{ кВт}$; $n = 980 \text{ об/мин}$, $\eta = 87\%$, $M_k/M_n = 2,2$, $M_n/M_n = 1,4$.

Сделаем проверку электродвигателя по перегрузочной способности и пусковому моменту:

$$M_n = 975 \frac{P_n}{n} = 975 \frac{10}{980} \approx 10 \text{ кГм};$$

$$M_k = 10 \cdot 2,2 = 22 \text{ кГм};$$

$$M_n = 10 \cdot 1,4 = 14 \text{ кГм}.$$

По перегрузочным и пусковым свойствам двигатель подходит.

Задача 30.4 Пользуясь каталогом, выбрать асинхронный короткозамкнутый двигатель для подъемного механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме по графику нагрузки. Скорость вращения n , продолжительности ступеней нагрузки t и соответствующие величины мощности нагрузки P приведены в таблице 30.4.

Таблица 30.4

Параметр		Вариант задания										
		К	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n, об/мин		900	800	800	900	900	1000	1000	950	950	1000	800
1 ступень	t, с	40	10	15	20	30	35	20	40	35	80	90
	M, кГМ	5	8	12	60	45	15	80	120	95	70	25
2 ступень	t, с	90	90	80	60	120	70	150	180	20	30	50
	M, кГМ	2,1	4	6	45	88	12	50	100	35	40	20
3 ступень	t, с	430	30	45	120	80	60	30	20	120	180	30
	M, кГМ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Решение задачи для варианта К.

График нагрузки показан на рисунке 30.3. Определим эквивалентную мощность за рабочий период

$$P_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2}{t_1 + t_2}} = \sqrt{\frac{5^2 \cdot 40 + 2,1^2 \cdot 90}{40 + 90}} = 3,6 \text{ кВт}$$

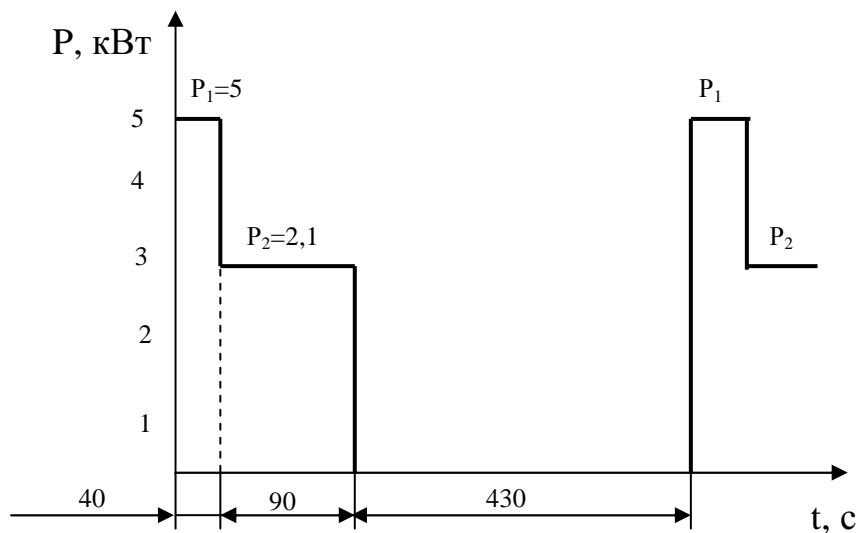


Рисунок 30.3 – График нагрузки

Фактическая продолжительность включения

$$ПВ_1 = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} \cdot 100 = \frac{40 + 90}{40 + 90 + 430} \cdot 100 = 23\%$$

Пересчитаем эквивалентную мощность на стандартное значение $ПВ_2=25\%$

$$P'_{\text{екв}} = P_{\text{екв}} \sqrt{\frac{ПВ_1}{ПВ_2}} = 3,6 \sqrt{\frac{23}{25}} = 3,46 \text{ кВт.}$$

По величине $P'_{\text{екв}}=3,46$ кВт по каталогу выбираем асинхронный короткозамкнутый двигатель крановой серии типа МТК12-6, для которого при $ПВ = 25\%$ $P_n=3,5$ кВт, $n = 883$ об/мин:

$$\frac{M_{\kappa}}{M_n} = 2,6; \quad \frac{M_n}{M_n} = 2,6.$$

Выбранный двигатель подходит также по перегрузочным и пусковым свойствам.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АД -асинхронный двигатель

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика

ВАХ - вольт-амперная характеристика

ЕСКД - единая система конструкторской документации

к.з. - короткое замыкание

КПД - коэффициент полезного действия

МПТ - машина постоянного тока

ПРУ - пускорегулирующее устройство

ПТБ - правила техники безопасности

ПТМ – подъемнотранспортные машины

ПТЭ - правила технической эксплуатации

ПУЭ - правила устройства электроустановок

СГ - синхронный генератор

СД - синхронный двигатель

СКВ - система кондиционирования воздуха

СМ - синхронная машина

СНИП- строительные нормы и правила

ТП - трансформаторный пункт

ЭИП - электроизмерительный прибор

ЭДС - электродвижущая сила

ЭП - электропривод

ЭРМ - электрическая ручная машина

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматический выключатель 21, 361
Автотрансформатор 21, 141, 179
Ампер 11
Амперметр 21, 133 156
Амплитуда 12, 75
 комплексная 76
Анод 264
Аппарат сварочный 341
 с отдельным дросселем 341
 со встроенным дросселем 343
 с подвижным магнитным шунтом 343

Б

База транзистора 269

В

Ватт 30
Ваттметр 21, 130, 136
Ветвь 18
Вибратор 374
Вольт 12
Вольтметр 21, 134
Выключатель конечный 348, 359
Выпрямитель 273
 однофазный двухполупериодный 276
 однофазный однополупериодный 274
 однофазная мостовая схема 278
 полупроводниковый 265
 трехфазный с нулевой точкой 280
 трехфазная мостовая схема 283
 управляемый 285

Г

Генератор 21, 114, 167
 постоянного тока 184, 187
 с независимым возбуждением 195
 с параллельным возбуждением 196
 с последовательным возбуждением 198
 со смешанным возбуждением 199
 сварочный 339
 синхронный 243

Д

Двигатель асинхронный 212
 асинхронный однофазный 236
 постоянного тока 184, 201
 синхронный 252

Двухполосник:

 активный 18, 60, 63
 пассивный 18, 63

Действующее значение 70, 76

Диаграмма векторная 73

Диаграмма нагрузочная 315

Диапазон регулирования 320

Диод полупроводниковый 263

Е

Емкость, 14
ЕСКД 17, 20

Ж

Жесткость механической характеристики 204, 309

З

Заземление защитное 414
Закон Джоуля-Ленца 32
Закон Ома, 23
 обобщенный для участка цепи 27
 в комплексной форме для участка цепи 86, 88, 91
Закон электромагнитной индукции 68
Законы Кирхгофа 43

И

Измерение мощности 158
 активной мощности 160
 напряжения 154
 неэлектрических величин 164
 реактивной мощности 162
 тока 154
 электрической энергии 163
Индуктивность 13
 взаимная 14
Источник света 390
 тока, 16
 ЭДС, 15

К

Катод полупроводникового диода 264
Класс точности ЭИП 135, 138, 140
Коллектор электрической машины 185
Коллектор транзистора 269
Конденсатор 15, 18
Контроллер 301, 351

Комплекс полной мощности 98, 101
 полного сопротивления 95
 полной проводимости 106
Кондиционер 401
Коэффициент:
 асинхронного двигателя 217
 запаса 316
 мощности $\cos\varphi$ 98, 109
 перегрузочной способности 227
 плавности регулирования 320
 полезного действия 31
 пульсации 278
 трансформации 140, 172
 трансформации ЭДС асинхронного
двигателя 217

Л

Лифт 401

М

Машина подъемно-транспортная 347
Машина электрическая 184
 асинхронная 212
 постоянного тока 184
 синхронная 241
Мера 129:
 мера образцовая 129
 мера рабочая 129
Метод дифференциальный 150
 замещения 150
 контурных токов 54
 наложения 57
 непосредственной оценки 158
 нулевой 150
 средних потерь 316
 удельной мощности 396
 узловых потенциалов 52
 эквивалентного генератора 60
 эквивалентных величин 316
 эквивалентных преобразований 38
Момент:
 активный сопротивления 306
 вращающий АД 225
 критический 226
 номинальный 227
 реактивный сопротивления 306
 сопротивления (статический) 306
 электромагнитный 214, 246
Мощность 30
 активная 98
 индуктивной катушки 95

 мгновенная 67, 83
 номинальная 109, 225, 315,
 полезная 30
 полная 96
 потерь 30
 реактивная 98
 реактивная емкостная 92
 реактивная индуктивная 89
 электромагнитная 225

Н

Нагревостойкость 313
Нагрузка 26, 127
 допустимая двигателя 227
Напряжение 12
 короткого замыкания 25, 176
 линейное 118
 номинальное 27
 фазное 122
 холостого хода 25
Нейтраль 116

О

Обмотка возбуждения 184, 193
 вторичная трансформатора 171
 компенсационная 189
 первичная трансформатора 171
Отопление электрическое 405
Ом 13, 23
Опыт:
 короткого замыкания 176
 холостого хода 175
Освещенность 389
Относительная продолжительность
включения 318

П

Переключение обмоток АМ:
 с одинарной звезды на двойную 332
 с треугольника на двойную звезду 332
Период 12
Плавность регулирования 320
Погрешность 129, 146
 абсолютная 146
 методическая 146
 относительная 147
 приведенная 147
 систематическая 146
 случайная 146
Полоса пропускания усилителя 297
Последовательность:

обратная 115
прямая 115
Порог чувствительности 131
Преобразователь измерительный 138
Принцип:
 взаимности 58
 суперпозиции 57
Проводимость 36
 активная 106
 взаимная 53
 реактивная 106

Р

Работа электрического тока 29
Реакция якоря 188
Режим генераторный 215
 динамического торможения 234
 длительный 317
 короткого замыкания 25, 173
 кратковременный 317
 номинальный 27
 переходный 307
 повторно-кратковременный 318
 противовключения 215
 согласованный 27, 33
 тормозной 233
 установившийся 201, 234
 холостого хода 25, 172
Резистор 15, 21
Резонанс:
 напряжений 103
 токов 108
Реле 21, 353
Ротор 212:
 короткозамкнутый 213
 фазный 213

С

Сварка 336:
 дуговая 336
 контактная 337
 под флюсом 337
Световой поток 389
Сила света 389
Система:
 водоснабжения 403
 измерительная информационная 130
 кондиционирования воздуха 400
Сквозность управляющих импульсов 326
Скольжение 214:
 критическое 236

Скорость вращения 188, 201, 229
Сопротивление 13
 активное 67, 83
 входное 39, 62
 добавочное 134
 емкостное 90
 индуктивное 88
 комплексное 88, 103
 полное индуктивной катушки 93
 реактивное 102
 эквивалентное 35, 37, 42
Статор 212
Схема замещения 17, 173, 222
 цепи 17
Схема измерительная:
 мостовая 151
 компенсационная 153

Т

Тиристор 266
Ток 10:
 активная составляющая 79
 контурный 55
 короткого замыкания 25
 линейный 118
 номинальный 27
 переменный 11
 периодический 11
 постоянный 11
 реактивная составляющая 79
 синусоидальный 12
 фазный 118
 холостого хода 26, 172
Транзистор 268
Трансформатор 170:
 измерительный 181
 измерительный напряжения 140
 измерительный тока 140
 однофазный 171
 трехфазный 178
Трехфазная система 114:
 несимметричная 118
 симметричная 115
Треугольник:
 напряжений 95
 комплексов сопротивлений 95

У

Угол:
 сдвига фаз 72
 регулирования 288

Узел 18
Усилитель 142, 296
Установка электроизмерительная 129
Устойчивость статическая 312

Ф

Фаза 72
 начальная 72
Фильтр:
 емкостной 293
 индуктивный 294
 сглаживающий 273, 292

Х

Характеристика 13:
 амплитудно-частотная 295
 вольт-амперная 263
 внешняя генератора 196, 198
 внешняя трансформатора 175, 177
 естественная 203
 механическая 195, 202
 моментная 229
 реостатная 204
 скоростная 195, 229
 угловая синхронной машины 247
 холостого хода 194, 197, 245
 электромеханическая 202

Ц

Цена деления 131
Цепь электрическая 10:
 неразветвленная 13
 разветвленная 13, 18
 линейная, 13
 нелинейная 13

Ч

Частота 12:
 угловая 72
Чувствительность ЭИП 131
 абсолютная 131
 относительная 131
 порог чувствительности 131

Ш

Шунт 133, 138

Щ

Щетки 186, 214, 339

Э

Электрическая ручная машина 371

Электрический:

 знак 410
 ожог 409
 удар 409

Электрический привод 300

Электробезопасность 408

Электродвигатель 201:

 асинхронный 212
 крановый 348
 независимого возбуждения 193, 201
 последовательного возбуждения 193, 204
 постоянного тока 201
 синхронный 252
 смешанного возбуждения 193, 208

Электроизмерительный прибор 129:

 аналоговый 130, 142
 магнитоэлектрической системы 132
 ферродинамический 137
 цифровой 130, 143
 электродинамический 136
 электромагнитной системы 134

Электроизмерительная установка 129

Электродвижущая сила (ЭДС) 10, 12:

 самоиндукции 68
 статора и ротора 216

Электроконвектор 406

Электропрогрев бетона 380

Электропрогрев грунта 385

Элемент:

 активный 14
 идеальный 15
 индуктивный 68
 емкостной 69
 линейный 13
 нелинейный 13
 пассивный 14
 резистивный 67

Эмиттер транзистора 269

Я

Якорь 185

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Греческий алфавит

№ п. п	Буква	Произношение	№ п. п	Буква	Произношение
1	Α, α	альфа	13	Ν, ν	ни (ню)
2	Β, β	бета	14	Ξ, ξ	кси
3	Γ, γ	гамма	15	Ο, ο	омикрон
4	Δ, δ	дельта	16	Π, π	пи
5	Ε, ε	эпсилон	17	Ρ, ρ	ро
6	Ζ, ζ	дзета	18	Σ, σ	сигма
7	Η, η	эта	19	Τ, τ	тау
8	Θ, θ	тэта	20	Υ, υ	ипсилон
9	Ι, ι	йота	21	Φ, φ	фи
10	Κ, κ	каппа	22	Χ, χ	хи
11	Λ, λ	ламбда	23	Ψ, ψ	пси
12	Μ, μ	ми (мю)	24	Ω, ω	омега

Латинский алфавит

№ п. п	Буква	Произношение	№ п. п	Буква	Произношение
1	A, α	а	14	N, n	эн
2	B, b	бэ	15	O, o	о
3	C, c	це	16	P, p	пэ
4	D, d	дэ	17	Q, q	ку
5	E, e	е	18	R, r	эр
6	F, f	эф	19	S, s	эс
7	G, g	гэ, же	20	T, t	тэ
8	H, h	ха, аш	21	U, u	у
9	I, i	и	22	V, v	вэ
10	J, j	йота (жи)	23	W, w	дубль-вэ
11	K, k	ка	24	X, x	икс
12	L, l	эль	25	Y, y	игрек
13	M, m	эм	26	Z, z	зет

Буквенные обозначения основных электрических и магнитных величин

Для обозначений используют буквы латинского и греческого алфавита.

2.1 Обозначения основных величин буквами латинского алфавита:

A – потенциал магнитный, векторный.

B – магнитная индукция.

B, b – реактивная проводимость.

C – емкость.

E – напряженность электрического поля.

E, e – электродвижущая сила.

F – магнитодвижущая сила.

f – частота колебаний.

G, g – проводимость активная.

H – напряженность магнитного поля.

I, i – электрический ток.

j – плотность электрического тока.

L – индуктивность собственная.

M – индуктивность взаимная.

m – число фаз многофазных систем.

N – число витков.

n – коэффициент трансформации.

P – мощность активная.

p – момент электрический, число пар полюсов.

Q – мощность реактивная.

R, r – сопротивление электрическое активное.

S – мощность полная.

T – период колебаний.

U, u – напряжение.

W – электромагнитная энергия.

w – число витков.

X, x – сопротивление реактивное.

Y, y – проводимость полная.

Z, z – сопротивление полное.

2.2 Обозначения основных величин буквами греческого алфавита:

γ – проводимость электрическая удельная.

δ – коэффициент затухания, угол потерь.

ε – диэлектрическая проницаемость (ε_0 – диэлектрическая постоянная).

λ – длина электромагнитной волны.

μ – магнитная проницаемость (μ_0 – магнитная постоянная).

ρ – сопротивление электрическое удельное.

Φ – магнитный поток.

ϕ – электрический потенциал, сдвиг фаз между током и напряжением.

ψ – потокосцепление.

Ω, ω – круговая частота, частота колебаний.

Постоянная электрическая величина и действующее значение переменной величины обозначаются прописной буквой; мгновенное значение переменной величины обозначается строчной буквой. Амплитудное значение синусоидальной величины обозначается как действующее значение с индексом m . Например:

I, U, E – постоянные ток, напряжение, ЭДС, действующие значения переменного тока, напряжения, ЭДС;

i, u, e – мгновенные значения синусоидальных тока, напряжения, ЭДС.

I_m, U_m, E_m – амплитуда синусоидальных тока, напряжения, ЭДС.

2.3 Комплексные величины обозначаются следующим образом:

$$\underline{A} = A' + j'';$$

$$\underline{A} = \operatorname{Re} \underline{A} + j \operatorname{Im} \underline{A};$$

$$\underline{A} = A e^{j\alpha};$$

$$\underline{A} = |\underline{A}| e^{j\varepsilon};$$

$$\underline{A} = \cos \alpha + j \sin \alpha,$$

где \underline{A} – комплексная величина;

$A' = \operatorname{Re} \underline{A}$ – действительная часть комплексной величины;

$A'' = \operatorname{Im} \underline{A}$ – мнимая часть комплексной величины;

$A = |\underline{A}|$ – модуль комплексной величины;

α – аргумент комплексной величины.

При обозначении комплексных электрических величин используют буквенные обозначения, принятые для этих величин, например:

$$\underline{S} = P + jQ,$$

где \underline{S} – комплексная мощность;

P – активная мощность;

Q – реактивная мощность.

Для обозначения комплексных величин, являющихся синусоидальными функциями времени, применяют их основное буквенное обозначение с точкой над ним. Например:

$$\dot{I} = I e^{j\alpha};$$

$$\dot{U} = U \cos \alpha + j U \sin \alpha;$$

$$\dot{\Phi} = \Phi' + j \Phi''.$$

Приведенная комплексная величина обозначается звездочкой сверху:

$$\underline{A}^* = A' - j'';$$

$$\underline{A}^* = \operatorname{Re} \underline{A} - j \operatorname{Im} \underline{A};$$

$$\underline{A}^* = A e^{-j\alpha};$$

$$\underline{A}^* = |\underline{A}| e^{-j\varepsilon};$$

$$\underline{A}^* = \cos \alpha - j \sin \alpha.$$

Для обозначения векторов тока, напряжения, ЭДС и других величин применяют их буквенные обозначения с рисками над величиной вектора: \vec{I} , \vec{U} , \vec{E} и т. д.

Приложение 3

Единицы Международной системы (SI)

Наименование величины	Единица			
	Название	Размерность	Обозначение	
			русское	между- народное
Основные единицы				
Длина	метр	m	m	m
Масса	килограмм	kg	kg	kg
Время	секунда	s	s	s
Сила электрического тока	ампер	A	A	A
Температура	градус Кель- вина	K	K	K
Сила света	кандела	cd	cd	cd
Производные единицы электрических величин				
Плотность электрического тока	Ампер на квадратный метр	A/m^2	A/m^2	A/m^2
Количество электричества	кулон	$A \cdot s$	$кл$	C
Электрическое напряже- ние, ЭДС	Вольт	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s}$	V	V
Электрическая емкость	фарада	$\frac{A^2 \cdot c^4}{kg \cdot m^2} = \frac{c}{Om}$	Φ	F
Электрическое сопротив- ление	Ом	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot c^3} = \frac{B}{A}$	Om	Ω
Удельное электрическое сопротивление	Ом на метр	$\frac{kg \cdot m^3}{A^2 \cdot c^3} = Om \cdot m$	$Om \cdot m$	$\Omega \cdot m$
Электрическая проводимость	сименс		Cm	S
Производные единицы магнитных величин				
Магнитный поток	Вебер	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot c^2}$	$Bб$	Wb
Магнитная индукция	Тесла	$\frac{kg}{A \cdot c^2}$	$Tл$	

Продолжение приложения 3

Наименование величины	Единица			
	Название	Размерность	Обозначение	
			русское	международное
Напряженность магнитного поля	Ампер на метр	$\frac{A}{m}$	$\frac{A}{m}$	$\frac{A}{m}$
Индуктивность	Генри	$\frac{кг \cdot м^2}{А^2 \cdot с^2} = Ом \cdot с$	Гн	Н
Магнитная проницаемость	Генри на метр	$\frac{Гн}{м}$	$\frac{Гн}{м}$	$\frac{Н}{м}$
Магнитодвижущая сила	Ампер	A	A	A
Электромагнитная энергия	Джоуль		Дж	J
Активная мощность	Ватт	$В \cdot А$	Вт	W
Реактивная мощность	ВАр	$В \cdot А$	вар	var
Полная мощность	Вольт-Ампер	$В \cdot А$	ВА	VA

Приложение 4

Множители и префиксы для образования кратных и частичных единиц

Множитель	Название префикса	Обозначение		Наименование множителя
		русское	международное	
10^{18}	экса	Э	E	квинтиллион
10^{15}	пета	П	P	квадриллион
10^{12}	тера	Т	T	триллион
10^9	гига	Г	G	миллиард
10^6	мега	М	M	миллион
10^3	кило	к	k	тысяча
10^2	гекто	г	h	сто
10^1	дека	да	da	десять
10^{-1}	деке	д	d	одна десятая
10^{-2}	санتي	с	c	одна сотая
10^{-3}	милли	м	m	одна тысячная
10^{-6}	микро	мк	μ	одна миллионная
10^{-9}	нано	н	n	одна миллиардная
10^{-12}	пико	п	p	одна триллионная
10^{-15}	фемто	ф	f	одна квадриллионная
10^{-18}	ато	а	a	одна квинтилионная

Приложение 5

Токовые нагрузки на провода при сваривании

Сечение жилы, мм ²	Допустимая нагрузка на сварочный провод, А			
	одножильный		двужильный	
	продолжительная	повторно-кратковременная	продолжительная	повторно-кратковременная
Температура воздуха -5°C				
10	119	165	198	275
16	158	220	251	248
25	211	293	330	460
35	251	349	396	550
50	310	431	489	679
70	383	533	620	863
95	467	650	-	-
120	546	760	-	-
Температура воздуха +25°C				
10	90	125	150	208
16	120	167	190	264
25	160	222	250	348
35	190	264	300	416
50	235	327	370	514
70	290	404	470	654
95	354	492	-	-
120	414	575	-	-
Температура воздуха +30°C				
10	71	99	118	164
16	95	132	150	203
25	126	175	197	275
35	160	208	237	320
50	186	258	292	405
70	229	319	371	515
95	280	382	-	-
120	327	458	-	-

Примечание. При повторно-кратковременной нагрузке основное время сваривания не более 4 мин, общая продолжительность цикла - 10 мин.

Электродвигатели постоянного тока продолжительного режима типа ПН, 220 В,
защищенные с регулированием частоты вращения до 1:2

Тип	$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/мин	$I_{\text{я.н}}$, А	Число активных проводов якоря, N	Число параллельных ветвей якоря	Число пар полюсов, 2р	Сопротивление			Витков на полюс		Номинальный ток параллельной обмотки, А	Номинальный ток полюса Φ , мВб	Момент инерции якоря J , кг м ²	Масса двигателя, кг
							Якорь+дополнительные полюса, $R_{\text{я}}+R_{\text{дл}}$, Ом	Стабилизирующая обмотка, $R_{\text{пос}}$, Ом	Параллельная обмотка, $R_{\text{пар}}$, Ом	Стабилизирующая обмотка, $w_{\text{пос}}$	Параллельная обмотка, $w_{\text{пар}}$				
ПН-45	2,5	1000-1950	14,1	1218	2	4	1,37	0,11	372	12	2400	0,48	4,8	0,07	107
	4,4	1500-2100	23,5	812	2	4	0,6	0,043	298	9	2300	0,6	5,0	0,07	107
	6,6	2200- 2400	35,0	522	2	4	0,26	0,043	298	9	2300	0,6	5,4	0,07	107
ПН-68	3,7	1000- 1750	21,0	1116	2	4	0,89	0,05	250	11	2200	0,71	5,2	0,125	135
	6,5	1550- 2000	35,0	744	2	4	0,364	0,012	250	6	2200	0,71	5,2	0,125	135
	10,0	2250- 2400	52,2	496	2	4	0,17	0,012	188	6	1900	0,95	5,6	0,125	135
ПН-85	5,6	1000-1750	30,0	744	2	4	0,48	0,04	228	8	1750	0,78	8,1	0,16	175
	9,0	1500- 2000	48,0	496	2	4	0,22	0,02	228	6	1750	0,78	8,3	0,16	175
ПН-100	5,8	780- 1500	34,0	1112	2	4	0,62	0,013	136	6	1800	1,3	7,0	0,4	290
	10,0	1090- 1900	55,0	834	2	4	0,33	0,009	136	6	1800	1,3	6,6	0,4	290
	15,0	1560- 2000	81,5	556	2	4	0,143	0,004	96	4	1500	1,8	7,1	0,4	175
ПН-145	8,5	780- 1500	46,5	834	2	4	0,36	0,014	166	8	1700	1,1	9,3	0,5	330
	13,5	1050- 1500	73,0	556	2	4	0,12	0,006	150	4	1700	1,2	10,5	0,5	330
	21,0	1500- 1900	110	420	2	4	0,09	0,004	150	4	1700	1,2	9,7	0,5	330
ПН-205	14,0	750- 1500	76	700	2	4	0,22	0,01	92	8	1500	1,9	11,5	1,0	480
	20,5	970- 1700	110	556	2	4	0,08	0,006	92	6	1500	1,9	11,4	1,0	480
	33,5	1580- 1900	174	350	2	4	0,054	0,002	92	3	1500	1,9	11,2	1,0	480
ПН-290	19,0	750- 1300	102	524	2	4	0,122	0,007	86	6	1400	2,1	15,6	1,2	530
	29,0	1000- 1600	151	396	2	4	0,070	0,002	57	3	1250	3,1	15,5	1,2	530
	46,5	1500- 1800	238	278	2	4	0,035	0,002	59	3	1250	3,0	15,0	1,2	530

Приложение 7

Крановые асинхронные электродвигатели с фазным ротором типов МТ и МТВ, 380 В, 50 Гц, ПВ = 25% (изоляция классов Е, В)

Тип	$P_{\text{н}}$, кВт	$n_{\text{н}}$, об/мин	$M_{\text{нв}}/M_{\text{н}}$	Статор						Ротор					Момент инерции ротора J , кг м ²	Масса двигателя, кг
				cosφ		$I_{\text{с.н}}$, А	$I_{\text{с.хх}}$, А	$R_{\text{с}}$, Ом	$X_{\text{с}}$, Ом	\mathcal{E}_p , В	$I_{p.\text{н}}$, А	R_p , Ом	X_p , Ом	Коэфф. трансформации напряжения $k_{\text{е}}$ ($k = k_{\text{е}}^2$)		
				номинальный	холостого хода											
МТ011-6	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93	112	9,3	0,695	0,57	3,14	0,0212	51
МТ012-6	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58	144	11,0	0,67	0,58	2,5	0,0288	58
МТ111-6	3,5	915	2,3	0,70	0,11	10,5	6,6	2,16	2,03	181	13,7	0,525	0,755	1,96	0,0488	76
МТ112-6	5,0	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39	206	16,6	0,50	0,43	1,72	0,0675	88
МТ211-6	7,5	935	2,5	0,70	0,09	20,8	11,8	0,68	1,07	255	19,8	0,44	0,88	1,38	0,115	120
МТВ311-6	11,0	945	2,8	0,73	0,09	28,6	16,7	0,54	0,57	172	42,5	0,11	0,225	2,1	0,225	170
МТВ311-8	7,5	695	2,5	0,71	0,09	21,0	14,0	0,88	0,965	251	20,5	0,47	0,72	1,41	0,275	210
МТВ312-6	16	955	2,8	0,77	0,08	37,6	20,6	0,33	0,41	208	49,5	0,0099	0,25	1,75	0,313	210
МТВ312-8	11	710	2,8	0,66	0,10	33,0	22,1	0,53	0,56	182	41,0	0,13	0,23	1,96	0,387	210
МТВ411-6	22	965	2,8	0,71	0,07	55,0	33,2	0,19	0,31	225	61,0	0,066	0,23	1,6	0,5	280
МТВ411-8	16	715	2,8	0,65	0,08	45,7	30,2	0,285	0,43	207	49,5	0,103	0,25	1,73	0,538	280
МТВ412-6	30	970	2,8	0,73	0,06	70,5	42,0	0,125	0,23	259	72,0	0,055	0,225	1,4	0,675	345
МТВ412-8	22	720	2,8	0,69	0,07	58,0	37,1	0,207	0,32	234	59,0	0,09	0,24	1,53	0,75	345
МТВ511-6	30	720	2,8	0,68	0,06	77,0	46,0	0,123	0,245	280	67,5	0,082	0,28	1,28	1,025	410
МТВ512-8	40	730	2,8	0,69	0,06	101	60	0,08	0,17	322	76,5	0,072	0,24	1,12	1,4	500

Приложение 8

Крановые асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типов МТК и МТКВ, 380 В, 50 Гц, ПВ = 25% (изоляция классов Е, В)

Тип	P_n , кВт	n_n , об/мин	M_{max}/M_n	$M_{ср}/M_n$	Статор							
					$I_{сн}/I_n$	cosφ			$I_{с.н}$, А	$I_{с.хх}$, А	R_c , Ом	X_c , Ом
						пуско- вой	номи- наль- ный	холос- того хода				
МТК011-6	1,4	870	2,8	2,8	3,0	0,86	0,69	0,15	4,8	3,2	5,98	3,93
МТК012-6	2,2	875	2,8	2,8	3,1	0,85	0,7	0,13	7,2	4,6	3,6	2,58
МТК111-6	3,5	870	2,8	2,8	3,5	0,85	0,74	0,11	10,1	6,1	2,16	2,03
МТК112-6	5,0	890	3,0	3,0	3,9	0,80	0,75	0,12	13,5	8,4	1,32	1,39
МТК211-6	7,5	905	2,9	2,8	4,3	0,72	0,79	0,09	18,4	11,0	0,68	1,07
МТКВ311-6	11,0	910	3,1	2,8	4,9	0,72	0,8	0,09	26	15,7	0,54	0,575
МТКВ311-8	7,5	680	3,1	2,9	4,4	0,76	0,74	0,09	20	13,2	0,88	0,965
МТКВ312-6	16	905	3,1	2,8	4,9	0,70	0,79	0,08	37,8	19,8	0,33	0,41
МТКВ312-8	11	690	3,1	3,1	4,6	0,77	0,71	0,10	30,4	21,3	0,53	0,56
МТКВ411-6	22	935	3,0	2,8	5,2	0,61	0,78	0,07	50	29,7	0,19	0,31
МТКВ411-8	16	695	3,3	3,0	4,8	0,66	0,73	0,08	41	28,2	0,285	0,43
МТКВ412-6	28	945	3,3	2,8	5,6	0,60	0,81	0,06	62	35,1	0,125	0,23
МТКВ412-8	22	695	3,3	3,0	5,0	0,65	0,76	0,07	53,2	35,8	0,207	0,32
МТК511-6	28	700	3,4	3,1	5,4	0,61	0,75	0,06	68	40	0,123	0,245
МТКВ512-8	37	705	3,6	3,3	5,8	0,61	0,72	0,06	91	55	0,08	0,17

Технические параметры синхронных двигателей

Тип	U_n , кВ	S_n , кВА	P_n , кВт	n_c , об/мин	$\cos\varphi_n$, опережаю- щий	$I_{c.n}$, А	$I_{p.n}$ при $\cos\varphi_n$, А	$I_{p.n.xxx}$, А	M_m/M_n
ДСЗ-2121-16	10	17000	14070	375	0,85	983	561	350	2,1
МС325-12/12	10	7000	5400	500	0,8	404	367	212	2,4
МС325-12/12	6	8000	6150	500	0,8	770	408	211	1,85
МС321-7/6	6	900	675	1000	0,8	86,5	278	139	2,0
МС323-14/8	3	3850	3300	750	0,9	740	466	295	2,25
МС321-6/6	3	850	640	1000	0,8	164	164	190	2,25

Продолжение приложения 9

Тип	Асинхронный пуск				Момент инерции ротора J , т м ²	Масса двигателя, т	Число витков		Обмоточный коэффициент статора, $k_{об}$	Полюсное деление τ , мм
	$I_{c.n}/I_{c.n}$	M_n/M_n	$M_{вх}/M_n$	$\cos\varphi_n$			фазы статора, w_c	Одного полюса ротора		
ДСЗ-2121-16	6,1	0,545	1,88	0,1	50	110	72	44,5	0,945	536
МС325-12/12	6,5	0,65	1,1	0,149	12,7	54	126	54,5	0,89	607
МС325-12/12	5,8	0,7	1,29	0,151	15,7	56	72	54,5	0,918	607
МС321-7/6	5,5	1	0,8	0,281	0,135	5,7	216	49,5	0,945	420
МС323-14/8	6	0,8	0,8	0,196	1,32	14	45	45,5	0,945	500
МС321-6/6	4,6	0,8	0,65	0,28	0,12	5,2	135	43,5	0,88	420

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Основная литература

1. **Березина, Т. Ф.** Задачник по общей электротехнике с основами электроники [Текст] / Н. Г. Гусев, В. В. Масленников. – М.: Высш. школа, 1991. – 380 с.
2. **Борисов, Ю. М.** Электротехника [Текст]: учебник для вузов / Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
3. **Данилов, И. А.** Общая электротехника с основами электроники [Текст]: учеб. пособие для вузов / П. М. Иванов. – М.: Высш. школа, 2000. – 751 с.
4. **Жаворонков, М. А.** Электротехника и электроника [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. В. Кузин. – М.: Изд. центр "Академия", 2005. – 400 с.
5. **Зайцев, В. Е.** Электротехника. Электроснабжение, электротехнология и электрооборудование строительных площадок [Текст]: учеб. пособие / Т. А. Нестерова. – М.: Издательский центр "Академия", 2004. – 128 с.
6. **Иванов, И. И.** Электротехника. Основные положения, примеры и задачи [Текст] / А. Ф. Лукин, Г. И. Соловьев. – СПб.: Изд-во «Лань», 2002. – 192 с.
7. **Касаткин, А. С.** Электротехника [Текст]: учебник для вузов / М. В. Немцов. – М.: Изд. центр "Академия", 2008. – 544 с.
8. **Китаев, В. Е.** Электротехника с основами промышленной электроники [Текст]: учебник для вузов. – М.: Высш. школа 1985. – 224 с.
9. **Колонтаєвський, Ю. П.** Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум [Текст] / А. Г. Сосков; за ред. А. Г. Соскова. – К.: Каравела, 2004. – 432 с.
10. **Константинов, В. И.** Сборник задач по теоретической электротехнике [Текст] / Н. Н. Мансуров, А. Ф. Симонов, А. А. Федоров-Королев. – М.: Энергия, 1968. – 240 с.
11. **Ломоносов, В. Ю.** Электротехника [Текст] / К. М. Поливанов, О. П. Михайлов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 400 с.
12. **Лябук, М. Н.** Електротехніка [Текст]: навч. посібник. – Луцьк: ЛДТУ, 2005. – 683 с.
13. **Матвійів, Д. І.** Основи електротехніки і електроніки [Текст]: навч. посібник. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – 133 с.
14. **Мілих, В. І.** Електротехніка та електромеханіка [Текст]: навч. посібник. – К.: Каравела, 2005. – 375 с.
15. **Морозов, А. Г.** Электротехника, электроника и импульсная техника [Текст]: учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1987. – 448 с.
16. **Общая электротехника с основами электроники** [Текст]: учебник / В. А. Гаврилюк, Б. С. Гершунский, А. В. Ковальчук и др. – К.: Выща школа, 1980. – 480 с.
17. **Основы промышленной электроники** [Текст]: учеб. пособие / В. Г. Герасимов, О. М. Князьков, Д. Е. Краснопольский; под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. школа, 1986. – 336 с.

18. **Паначевний, Б. І.** Загальна електротехніка: теорія і практикум [Текст]: підручник / Ю. Ф. Свергун. – К.: Каравела, 2004. – 440 с.
19. **Рекус, Г. Г.** Сборник задач по электротехнике и основам электроники [Текст]: учеб. пособие / А. И. Белоусов. – М.: Высш. школа, 2001. – 416 с.
20. **Рекус, Г. Г.** Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники [Текст]: учеб. пособие / В. Н. Чесноков. – М.: Высш. школа, 2001. – 255 с.
21. **Сборник задач по общей электротехнике** [Текст] / под ред. В. С. Пантюшина. – М.: Высш. школа, 1973. – 280 с.
22. **Справочное пособие по электротехнике и основам электроники** [Текст]: учеб. пособие / П. В. Ермуратский, А. А. Косякин, В. С. Листвин и др.; под ред. А. В. Нетушила. – М.: Высш. школа, 1986. – 248 с.
23. **Тамм, И. Е.** Основы теории электричества [Текст]: учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 615 с.
24. **Титаренко, М. В.** Електротехніка [Текст]: навч. посібник. – К.: Кондор, 2004. – 240 с.
25. **Трегуб, А. П.** Электротехника [Текст]: учеб. пособие / под ред. Э. В. Кузнецова. – К.: Высш. школа, 1987. – 600 с.
26. **Электротехника** [Текст]: учеб. пособие / М. Ю. Анвельт, В. Г. Герасимов, В. П. Данильченко и др.; под ред. В. С. Пантюшина. – М.: Высш. школа, 1976. – 560 с.
27. **Электротехника** [Текст]: учебник / Х. Э. Зейдель, В. В. Коген-Далин, В. В. Крымов и др.; под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. школа, 1985. – 480 с.

2. Дополнительная литература

28. **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники: в 2 т. [Текст]: учебник. – М.: Высш. школа, 1978. Т.1. – 528 с; Т.2. – 232 с.
29. **Брускин, Д. З.** Электрические машины: в 2 т. [Текст]: учебник / А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М.: Высш. школа, 1979. Т. 1. – 288 с; Т. 2. – 304 с.
30. **Вешеневский, С. Н.** Характеристики электродвигателей в электроприводе [Текст]. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
31. **Воробьев, А. Д.** Справочник электромеханика по лифтам [Текст] / В. Л. Сегал. – М.: Моск. рабочий, 1980. – 208 с.
32. **Гоков, А. М.** Основы электротехники и электроники. Элементы общей теории электротехники [Текст]: учеб. пособие / Е. А. Жидко. – Х.: ХНЕУ, 2006.
33. **Горбачев, Г. Н.** Промышленная электроника [Текст]: учебник / Е. Е. Чаплыгин; под ред. В. А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
34. **Добронравов, С. С.** Строительные машины и основы автоматизации [Текст]: учебник / В. Г. Дронов. – М.: Высш. школа, 2001. – 575 с.

35. **Иванов, А. А.** Справочник по электротехнике [Текст]. – К.: Высш. школа, 1984. – 304 с.
36. **Калашников, С. Г.** Электричество [Текст]: учеб. пособие. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
37. **Лотоцький, К. В.** Електричні машини і основи електропривода [Текст]: навч посібник. – К.: Вища школа, 1970. – 475 с.
38. **Нечаев, В. В.** Электрические машины [Текст]: учебник. – М.: Высш. школа, 1967. – 219 с.
39. **Панев, Б. И.** Электрические измерения: Справочник (в вопросах и ответах) [Текст]. – М.: Агропромиздат, 1987. – 224 с.
40. **Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок** [Текст]. – М.: Энергия, 1980. – 158 с.
41. **Правила устройства электроустановок** [Текст]. – Х.: Изд-во "Форт", 2009. – 736 с.
42. **Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники** [Текст] / под ред. П. А. Ионкина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 768 с.
43. **Сборник задач по теоретическим основам электротехники** [Текст] / под ред. Л. А. Бессонова. – М.: Высш. школа, 2000. – 528 с.
44. **Усатенко, С. Т.** Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник [Текст] / Т. К. Каченюк, М. В. Терехова. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 325 с.
45. **Хмара, Л. А.** Будівельні крани: Конструкції та експлуатація [Текст] / М. П. Колісник, О. І. Голученко. – К.: Техніка, 2001. – 296 с.
46. **Чиликин, М. Г.** Общий курс электропривода [Текст]: учебник / А. А. Сандлер. – М.: Энегоатомиздат, 1981. – 576 с.
47. **Шебес, М. Р.** Задачник по теории линейных электрических цепей [Текст] / М. В. Каблцкова. – М.: Высш. школа, 1990. – 544 с.
48. **Электрические измерения** [Текст]: учебник / Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин и др.; под ред А. В. Фремке и Е. М. Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
49. **Электротехника. Терминология: Справочное пособие** [Текст]: – Вып. 3. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 343 с
50. **Электротехнический справочник: в 3 т. Т. 3. Кн. 2. Использование электрической энергии** [Текст] / под общ. ред. профессоров МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 661 с.

3. Интернет-ресурсы

51. **Воропаев, Е. Г.** Электротехника: учеб. пособие. – Тула, 1999. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tspu.tula.ru/res/fizika/Elektrotehnika/>.
52. **Ильинский, Н. Ф.** Основы электропривода: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.eprivod.ru/publics.htm>.

53. **Кулик, А. Ю.** Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1969 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.induction.ru/books/book129/book129content.htm>.
54. **Матуско, В.Н.** Общая электротехника: учеб. пособие. – Новосибирск, 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ssga.ru/AllMetodMaterial./metod_mat_for_ioot/metodichki/matusko/index_m.html.
55. **Некрасова, Н. Р.** Общая электротехника и электроника / под общ. редакц. С. А. Панфилова. – Саранск, Мордовский ГУ, 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://toe.stf.mrsu.ru/Demo_versia/book/.
56. **Сайт "Інженерні системи"** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ing-sistem.ru/>.
57. **Сайт "іelectro"** – Усе про електротехніку [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ielectro.ru/Finder.html>.
58. **Сайт "Электронная электротехническая библиотека"** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electrolibrary.narod.ru/>.
59. **Сайт "Електричні машини. Питання і відповіді"** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elma.ho.ua/index.html>.
60. **Сайт нормативно-технической документации.** Раздел "Электротехника". [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ost-gost.ru/podrazdel-14.html>.
61. **Сайт компанії "Сучасні технології нагрівання"** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stn.com.ua/>.

Навчальне видання

АЧКАСОВ Анатолій Єгорович
ЛУШКІН Володимир Андрійович
ОХРІМЕНКО Вячеслав Миколайович
ВОРОНКОВА Тетяна Борисівна

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА У БУДІВНИЦТВІ

ПІДРУЧНИК
(рос. мовою)

Відповідальний за випуск: *А. Є. Ачкасов*

Редактор: *В. М. Охріменко*

Комп'ютерний набір: *Т. Б. Воронкова*

Комп'ютерне верстання: *І. В. Волосожарова*

Дизайн-обкладинки: *І. П. Шелехов*

Підп. до друку 03.04.2015 р.	Формат 60х84/16
Друк на ризографі	Ум. друк. арк. 28,1
Зам. №	Тираж 500 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014